

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Kristian Zulić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Kristian Zulić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesorici Veri Rede na odvojenom vremenu i pomoći prilikom izrade ovog rada.

Kristian Zulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KRISTIAN ZULIĆ**

Mat. br.: 0035192483

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izbor materijala za nogometnu loptu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Materials selection for football**

Opis zadatka:

U procesu razvoja bilo kojeg proizvoda izbor materijala je vrlo važan sastavni dio. U kombinaciji s dobrim konstrukcijskim rješenjem i primjenom odgovarajućih postupaka izrade, izbor optimalnog materijala uvelike će doprinijeti razvoju proizvoda sa što boljim uporabnim svojstvima, što nižom cijenom i što dopadljivijim izgledom. Takav proizvod će biti konkurentan na tržištu i ostvarit će dobit što i jest glavni cilj svake proizvodnje. U diplomskom radu potrebno je opisati postupak izbora materijala i izabrati optimalne materijale za nogometnu loptu, vodeći računa o zahtjevima i ograničenjima koji se postavljaju na ovaj specifični proizvod. Potrebno je navesti do sada korištene materijale i primijenjena konstrukcijska rješenja. Na temelju postavljenih zahtjeva i ograničenja potrebno je definirati svojstva na temelju kojih se provodi predizbor i konačni izbor materijala te usporediti dobivena rješenja s do sada korištenim materijalima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao: *Rede*
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:
Biserka Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. RAZVOJ PROIZVODA I IZBOR MATERIJALA	1
1.1. Ovisnost izbora materijala o vrsti proizvoda	5
1.2. Način izbora materijala u praksi	6
1.3. Metodologija izbora materijala	8
1.4. Osnovne skupine kriterija pri izboru materijala.....	11
1.5. Ponašanje materijala, podaci i svojstva.....	14
2. KVANTITATIVNE METODE IZBORA MATERIJALA	20
3. IZBOR MATERIJALA NOGOMETNE LOPTE	23
3.1. Povijest nogometnih lopti	23
3.2. Konstrukcija nogometne lopte	33
3.3. Svojstva slojeva nogometne lopte.....	37
3.4. Testiranja nogometne lopte	42
4. PREDIZBOR I IZBOR MATERIJALA.....	50
5. BUDUĆNOST NOGOMETNE LOPTE	53
6. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57
PRILOZI.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Izbor materijala u pojedinim fazama razvoja proizvoda [1]	3
Slika 2.	Dijagram toka postupka razvoja proizvoda i izbora materijala [1]	5
Slika 3.	Povezanost konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupaka proizvodnje [1]	8
Slika 4.	Dijagram toka izbora materijala [1]	10
Slika 5.	Utjecajni faktori na svojstva i ponašanje materijala [1]	15
Slika 6.	Shema specifikacije pokazatelja vrednovanja [1]	22
Slika 7.	Napuhani svinjski mjehur [2]	23
Slika 8.	Adidas Telstar [4]	24
Slika 9.	Adidas Telstar i Adidas Chile [4]	25
Slika 10.	Adidas Tango [4]	25
Slika 11.	Adidas Tango Espana [4]	26
Slika 12.	Adidas Azteca [4]	27
Slika 13.	Adidas Etrusco Unico [4]	27
Slika 14.	Adidas Questra [4]	28
Slika 15.	Adidas Tricolore [4]	29
Slika 16.	Adidas Fevernova [4]	29
Slika 17.	Adidas Teamgeist [4]	30
Slika 18.	Adidas Jabulani [4]	31
Slika 19.	Adidas Brazuca [4]	32
Slika 20.	Adidas Telstar 18 [4]	32
Slika 21.	Shematski prikaz konstrukcije lopte [7]	33
Slika 22.	Lopta s 32 panela [8]	34
Slika 23.	Konstrukcija nogometne lopte [8]	35
Slika 24.	Materijali za dijelove lopte [9]	37
Slika 25.	Uređaj za mjerenje radijusa [4]	44
Slika 26.	Postavljanje lopte u uređaj, mjerenje, uzorak mjerenja [4]	44
Slika 27.	Mjerenje odskakanja lopte [4]	45
Slika 28.	Brzina lopte u padu [4]	46
Slika 29.	Mjerenje apsorpcije vode [4]	46
Slika 30.	Mjerenje mase lopte [4]	47
Slika 31.	Mjerenje tlaka [4]	48
Slika 32.	Ispitivanje zadržavanja oblika i veličine [4]	49
Slika 33.	Presjek nogometne lopte s čipom [12]	53
Slika 34.	Promjena boje nogometne lopte [12]	54
Slika 35.	Rupičasti pokrov lopte [12]	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva pokrova	39
Tablica 2. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva obloga.....	40
Tablica 3. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva mjehura	41
Tablica 4. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva šavova	41
Tablica 5. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva ventila.....	42
Tablica 6. Broj lopte i redoslijed ispitivanja [4]	42
Tablica 7. Zahtjevi za loptu [4]	43
Tablica 8. Svojstva materijala pokrova [10,11]	50
Tablica 9. Svojstva materijala obloge [10,11].....	51
Tablica 10. Svojstva materijala mjehura	51
Tablica 11. Svojstva materijala šavova	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
G	N/mm^2	Modul smičnosti
ν	-	Poissonov omjer
ρ	kg/m^3	Gustoća
F_i	-	Funkcija cilja
X_i	-	Postojeće vrijednosti relevantnih svojstava
Y_i	-	Tražene vrijednosti relevantnih svojstava
B_i	-	Faktor važnosti
FIFA	-	Fédération Internationale de Football Association
CSM	-	Circumference and Sphericity Measuring System
O	cm	Opseg
r	cm	Radijus
Broj π	-	Pi

SAŽETAK

U procesu razvoja bilo kojeg proizvoda izbor materijala je vrlo važan sastavni dio. U kombinaciji s dobrim konstrukcijskim rješenjem i primjenom odgovarajućih postupaka izrade, izbor materijala uvelike doprinosi razvoju proizvoda sa što boljim uporabnim svojstvima, što nižom cijenom i što dopadljivijim izgledom. Takav proizvod će biti konkurentan na tržištu i ostvarit će dobit, što i jest glavni cilj svake proizvodnje.

U ovom radu detaljno je opisan sam razvoj proizvoda i postupak izbora optimalnog materijala. Pokazana je metodologija izbora materijala, način izbora materijala u praksi i kriteriji koji utječu na izbor materijala. Također je objašnjeno koja svojstva i karakteristike treba uzeti u obzir prilikom izbora materijala. Zatim su opisane neke od kvantitativnih metoda izbora materijala.

Kako je osnovni cilj rada bio izbor optimalnog materijala za nogometnu loptu, opisan je povijesni razvoj nogometne lopte te zahtjevi i ograničenja koja se postavljaju na ovaj specifični proizvod. Pojašnjena je i sama konstrukcija suvremene nogometne lopte koja je podijeljena po slojevima na pokrov, obloge, mjehur i šavove te su za svaki sloj analizirana svojstva. Navedeni su i opisani materijali koji se uobičajeno koriste za pojedine dijelove, a nakon toga su izabrani optimalni materijali za svaki dio lopte.

Kao optimalni materijal za pokrov nogometne lopte izabrana je poliuretanska sintetička koža, a za obloge različite kombinacije poliester, pamuka, ekspaniranog poliuretana ili ekspaniranog PVC-a. Optimalni materijal za mjehur nogometne lopte je lateks, a za šavove poliester.

U radu su navedena i opisana sva potrebna ispitivanja koja svaka lopta mora proći kako bi dobila dopuštenje FIFA-e za korištenje na profesionalnim utakmicama. Na kraju su razmotreni neki novi trendovi u dizajniranju nogometnih lopti i moguće izvedbe s kojima će se igrati u budućnosti.

Ključne riječi: izbor materijala, svojstva materijala, nogometna lopta.

SUMMARY

In the process of developing any product, the choice of materials is a very important component. Combined with a good constructional design and application of appropriate manufacturing methods, the choice of materials greatly contributes to the development of the product with the best usability properties, at a lower cost and more admirable appearance. Such a product will be competitive on the market and will generate profits, which is the main goal of any production.

This paper describes the development of the product and the process of selecting the optimal material. The methodology of choice of materials, the choice of material in practice and the criteria that influence the choice of materials are shown. It has also been explained which properties and characteristics should be taken into account when selecting materials. Then some of the quantitative methods of selecting materials are described.

As the main goal of the game was to choose the optimal material for the soccer ball, the historical development of soccer balls and the requirements and constraints on this specific product are described. The design of a contemporary soccer ball has been clarified, which is divided by layers on the cover, lining, bladder and seams and for each layer the properties are analyzed. The described materials are also commonly used for individual parts, and then the optimum materials are chosen for each part of the ball.

Polyurethane synthetic leather has been chosen as an optimal material for the soccer ball cover, and for different combinations of polyester, cotton, expanded polyurethane or expanded PVC, the optimal material for bladder football is latex and for polyester seams.

All the tests required by each ball to get FIFA's permission for use in a professional match are stated and described in the paper. Considered in the end are some new trends in designing soccer balls and possible performances that will be played in the future.

Key words: choice of material, material properties, soccer ball.

1. RAZVOJ PROIZVODA I IZBOR MATERIJALA [1]

Osnovni zadatak svake proizvodnje jest proizvesti što kvalitetniji proizvod, uz što bolja uporabna svojstva. Osim dobrih uporabnih svojstava, za svaki proizvod bitan je i dopadljiv izgled te što niža cijena uz što veću dobit. Da bi se sve to postiglo potrebno je za svaki pojedini proizvod unaprijediti proizvodne postupke izrade i konstrukcijska rješenja te pravilno izabrati materijal. Izbor optimalnog materijala je bitan sastavni dio ukupnog procesa razvoja proizvoda.

O izboru materijala mora se razmišljati već u fazi projektiranja i konstruiranja proizvoda. Ukoliko dođe do kasnijih nepredvidljivih promjena u konstrukcijsko-tehnološkoj dokumentaciji ili pogrešnih odluka u konstrukciji proizvoda, moguće je izabrati materijal i u fazi izrade ili nabave.

U fazi kreiranja ideje o proizvodu i u fazi izrade tehničke dokumentacije donose se važne odluke koje utječu na ukupne troškove proizvoda. Procjenjuje se da te odluke utječu na oko 70 % troškova proizvoda i ta činjenica govori o važnosti i odgovornosti svih aktivnosti u konstrukcijskom odjelu.

Četiri su osnovne skupine faktora u procesu razvoja proizvoda, od samog koncipiranja pa do detaljne konstrukcijske razrade:

- tehnički faktori
 - u ovu skupinu se ubrajaju funkcijski i eksploatacijski zahtjevi kao i tražena svojstva proizvoda, proizvodna i energetska svojstva.
- ekonomski faktori
 - sveukupni troškovi razvoja, troškovi proizvodnje, investicijski troškovi kao i cijena proizvoda ulaze u ekonomske faktore pri razvoju proizvoda. Važni pojmovi u ovoj skupini faktora su i produktivnost, rentabilnost, mogućnosti kooperacije, diverzificiranost proizvoda, potencijalne zemlje prodaje i dr.
- društveni (humani) faktori
 - pri razvoju proizvoda treba voditi računa i o različitim društvenim potrebama, utjecaju na okoliš i mogućnosti recikliranja. Također su važna ergonomska, estetska i informacijska svojstva.
- pravni faktori

- pri razvoju proizvoda moraju se poštivati određene norme, zakoni i propisi. Zaštita izuma, patenta, modela, postupka proizvodnje je također važan dio ove skupine faktora.

Pri konstruiranju proizvoda javljaju se razni problemi. Jedan od osnovnih problema je realizacija zadane funkcije koja se rješava na samom početku procesa razvoja proizvoda.

Pri analizi funkcije proizvoda razmatraju se sljedeće skupine faktora:

- radne karakteristike
 - u ovu skupinu ulaze masa i dimenzije proizvoda, trajnost i stupanj djelovanja. Također je bitna potrošnja energije, izvori energije i pogon, a treba voditi računa i o sigurnosti u radu, održavanju, prenosivosti...
- utjecaji u radu
 - postojeće sile i naprezanja, prekidi u radu, trenje i trošenje, moguće vibracije i udarci.
- djelovanje okoline
 - važni elementi ove skupine su temperatura, izloženost plamenu, vlažnost, zračenje, različiti plinovi i kemikalije, prašina, organizmi, elektricitet, ulja i masti, goriva.
- vezna djelovanja
 - u ovoj skupini su stanje i hrapavost površine, odstupanja od oblika, tražene tolerancije, utjecaj različitih pogrešaka...
- utjecaj na ljude
 - utjecaj na ljude je bitan faktor u funkciji proizvoda i zbog toga treba posebnu pažnju obratiti na zaštitu zdravlja, buku i šumove, električnu izoliranost, jednostavnost čišćenja i održavanja te posluživost, izgled i psihološko djelovanje.

Nakon što se definira uloga proizvoda u eksploataciji mogu se početi rješavati i ostali problemi kao što su trajnost, pouzdanost, način održavanja i izgled proizvoda. Estetsko oblikovanje je sve važnije pri konstruiranju proizvoda zbog svog utjecaja na konkurentnost na tržištu.

I postupak proizvodnje treba biti dobro razrađen kako bi imali podlogu za izradu kvalitetnog proizvoda uz što manje troškove.

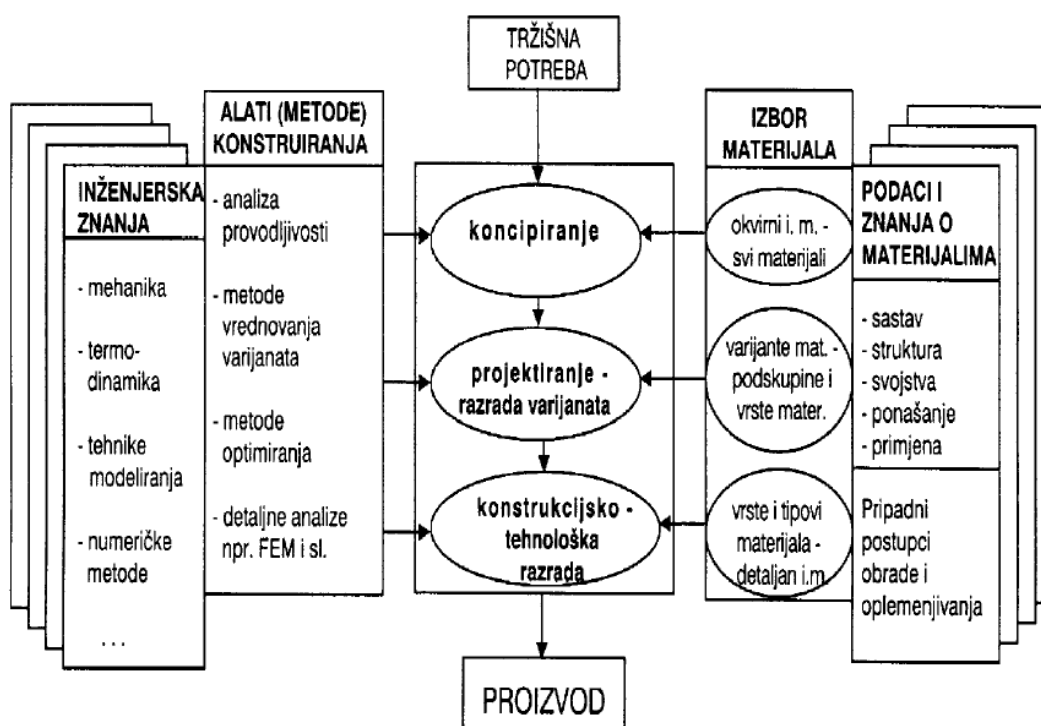
Postupak konstruiranja proizvoda može se podijeliti u tri karakteristične faze:

- koncipiranje proizvoda;

- projektiranje - razrada varijanti rješenja;
- konstruiranje dijelova i tehnološka razrada.

U svakoj od navedenih faza prisutan je izbor materijala. Unutar svake faze imamo različite veličine skupova materijala i različiti stupanj preciznosti rezultata.

Na slici 1 prikazan je izbor materijala u pojedinim fazama razvoja proizvoda.



Slika 1. Izbor materijala u pojedinim fazama razvoja proizvoda [1]

Faza koncipiranja proizvoda

Važna faza u razvoju novog proizvoda je koncipiranje varijanti. Razvoj svakog novog proizvoda počinje s poznatim ili unaprijed predodređenim zahtjevima. Pri tome se češće već postojeće konstrukcije prilagođavaju tržištu ili novom proizvodnom procesu, umjesto da se kreira i oblikuje potpuno novi proizvod. Inovativno razmišljanje i razmatranje svakog mogućeg rješenja je neophodno u oba slučaja.

U fazi koncipiranja proizvoda, u pogledu izbora materijala bi sve varijante trebale biti podjednako prikladne. Uvijek se uzima u obzir veći broj skupina i vrsta materijala, a obično se traži nekoliko istaknutih svojstava. Tu spadaju osnovna funkcionalna svojstva materijala (npr. vodič/izolator, proziran/neproiziran, lagan/težak i sl.). Zatim se utvrđuju polazni zahtjevi

vezani uz radnu temperaturu, agresivnost medija, vrstu vanjskog opterećenja, okvirni oblik i dimenzije, izgled i sl.

S obzirom da na početku razvoja ideje dominiraju skupine predvidljivih materijala potrebno ih je usporediti uzevši u obzir što više mogućnosti. Osnovni problem koji se pri tome javlja jest definiranje kriterija za usporedbu različitih materijala (čelik, lake legure i polimerni materijali).

Projektiranje - razrada varijanti rješenja

Nakon što se utvrdi izvedivost novog proizvoda i nakon što se definira nekoliko varijantnih koncepata za daljnju razradu proizvoda, pristupa se detaljnijoj analizi osnovne funkcije i konstrukcijskih zahtjeva. U ovoj fazi je također potrebno imati što različitije informacije o materijalima. Takve informacije možemo naći u različitim katalozima i bazama podataka. Ovdje se detaljnije razmatraju posebne skupine materijala te izdvajaju prikladne skupine i vrste materijala u obliku varijanti.

Na kraju ove faze dobiju se praktične specifikacije dijelova i sklopova, donekle definirani skup materijala te okvirni tijek procesa proizvodnje.

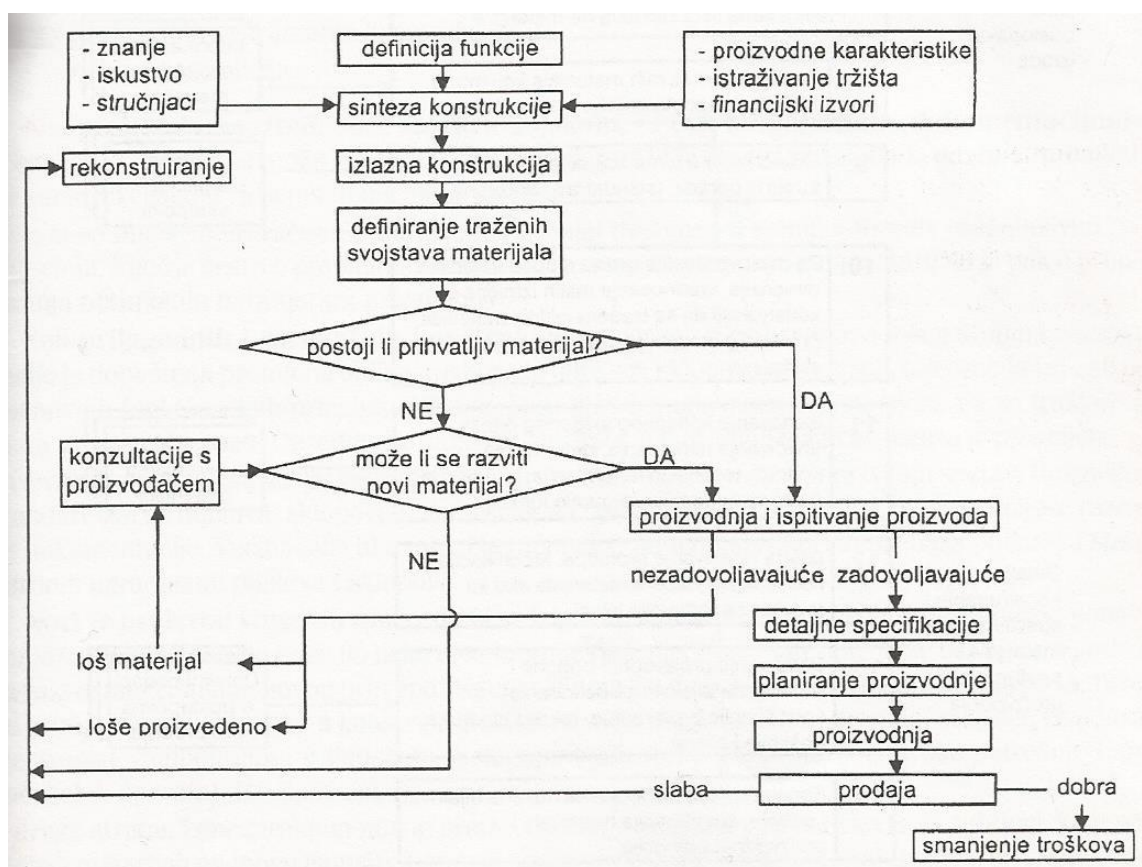
U ovoj fazi moguće je pozitivno utjecati na količinu ugrađenih materijala, potrebnu zalihu materijala i broj ugradbenih dijelova. Također se mogu razviti proizvodi koji zahtijevaju manje energije ili se može povećati pouzdanost proizvoda u odnosu na prijašnju verziju proizvoda. Uz sve navedeno treba voditi računa i o recikličnosti i obnovljivosti eksploatiranog proizvoda.

Konstruiranje dijelova i tehnološka razrada

Tehnološka razrada uključuje detaljnu analizu funkcije proizvoda kao i nuspojava koje nastaju tijekom eksploatacije proizvoda. U ovoj fazi je značajno smanjen broj potencijalnih materijala i za određeni konstrukcijski element ostalo je samo nekoliko materijala za završnu analizu. Preostali materijali se detaljno uspoređuju, proučava se način njihovog oblikovanja i ponašanja u eksploataciji. Također se utvrđuje kako materijal utječe na okoliš tijekom životnog vijeka proizvoda, od proizvodnje do uništavanja ili recikliranja. Tu se također definiraju oblik, dimenzije i stanje materijala, količina potrebnog materijala, mogućnost isporuke i ukupni troškovi materijala i proizvodnje. Prema svemu navedenom moguće je definirati i dobavljača (proizvođača) materijala. Informacije o materijalima se uspoređuju pri

čemu treba voditi računa o pouzdanosti izvora iz kojih se informacije dobivaju. Vrijednosti svojstava za istu vrstu materijala mogu se dosta razlikovati od proizvođača do proizvođača. Zato je nužno poznavati što točnije vrijednosti svojstava materijala kako bi se izbjegle greške u konačnim konstrukcijskim proračunima i pri razradi tehnoloških procesa. Sve ovo može značajno utjecati na konačne troškove proizvoda. Ovisno o važnosti dijelova i sklopova ponekad je potrebno dodatno ispitati neka od važnih svojstava materijala. Ispitivanja se mogu provesti u laboratorijskim uvjetima ili simuliranjem uvjeta rada na prototipovima.

Na slici 2 prikazan je postupak razvoja proizvoda i izbora materijala.



Slika 2. Dijagram toka postupka razvoja proizvoda i izbora materijala [1]

1.1. Ovisnost izbora materijala o vrsti proizvoda

Vrsta i tip proizvoda za koji biramo materijal određuju tijek i sadržaj izbora materijala. Postoje dva tipa proizvoda s obzirom na mogućnost intervencije izborom materijala:

- proizvodi s gotovom dokumentacijom kao što su licence, proizvodi u suradnji s kooperacijom i sl.;

- proizvodi i konstrukcije koji se razvijaju u vlastitom aranžmanu:
 - potpuno nove konstrukcije i proizvodi
 - prilagodba već postojećih rješenja

Ukoliko proizvodi imaju razrađenu konstrukcijsku ili čak tehnološku dokumentaciju, materijal može biti manje ili više definiran ili je dopuštena sloboda odabira (prilagodba konstrukcijskom rješenju ili načinu proizvodnje). Pritom se mora voditi računa o dostupnosti materijala i njegovoj obradivosti raspoloživim postupcima. Problemi koji se javljaju su pronalazak odgovarajuće zamjene preporučenog materijala ili propisivanje optimalnih parametara proizvodnje.

Kod prilagodnih i varijantnih konstrukcija govori se o proizvodima koji imaju viši stupanj razvoja. Ovdje je dopuštena promjena oblika, rasporeda dijelova, sklopova, dimenzija, tolerancija, ali nije dopuštena promjena osnovnih funkcionalnih principa rješenja. Uglavnom se traži optimalni materijal u novim uvjetima. Određuju se zamjenske vrste ili materijali koji imaju bolja svojstva i niže cijene. Kako su ove vrste konstrukcija najzastupljenije u praksi, za njih se razvijaju sustavi tipizacije i standardizacije dijelova, sklopova i materijala, ali i postupaka projektiranja i konstrukcijske razrade dokumentacije. Za većinu ovih aktivnosti koriste se baze podataka standardnih ugradbenih dijelova i sklopova.

Zbog izbjegavanja ponavljanja, a da bi se ujedno postiglo i razvilo neko bolje i djelotvornije rješenje pri konstruiranju novog proizvoda nužno je primjeniti izbor materijala. Novim materijalom može se dobiti funkcionalno novi princip rješenja ili proizvod bitno boljih, novih svojstava. Za to imamo primjere u konstrukciji dijelova svemirskih letjelica i uređaja, fuzijskih reaktora, u elektronici, implatima u ljudskom tijelu, sportskim rekvizitima, igračkama i sl.

Pri koncipiranju novog proizvoda mogu se pojaviti posebni zahtjevi koje postojeći materijali ne mogu ispuniti. Rješenja za ovu situaciju moguće je pronaći u materijalima čiji se sastav i struktura „projektiraju“.

1.2. Način izbora materijala u praksi

Iako je izbor materijala najčešće povezan s procesom razvoja proizvoda, postoje različiti razlozi za preispitivanjem primjenjenog materijala i načina dobivanja proizvoda. Pritom je cilj dobiti proizvod sa što višom kvalitetom uz što niže troškove.

Razlozi za preispitivanjem primjenjenog materijala mogu biti sljedeći:

- pronalazak novih materijala
- promijena uvjeta u eksploataciji
- viši zahtjevi u pogledu uporabnih karakteristika proizvoda
- problemi s nabavom definiranog materijala u pogledu vrste, oblika, stanja, dimenzija...
- ponašanje materijala u proizvodnji nije zadovoljavajuće
- nezadovoljavajuće ponašanje materijala u eksploataciji – prevelike deformacije, lomovi, prekomjerno mehaničko trošenje ili prekomjerna korozija
- uvođenje novih propisa, normi, zakona i uputa
- promjena zahtjeva za recikličnost i utjecaj materijala na okoliš
- težnja za smanjenjem troškova radi postizanja bolje konkurentnosti

Rezultati provedenih istraživanja (u domaćoj industriji) pokazali su da pri izboru materijala dominira iskustvo i subjektivnost, a da se puno rjeđe uspoređuju mjerljive, objektivne veličine. Četiri su glavne skupine čimbenika koji utječu na izbor materijala:

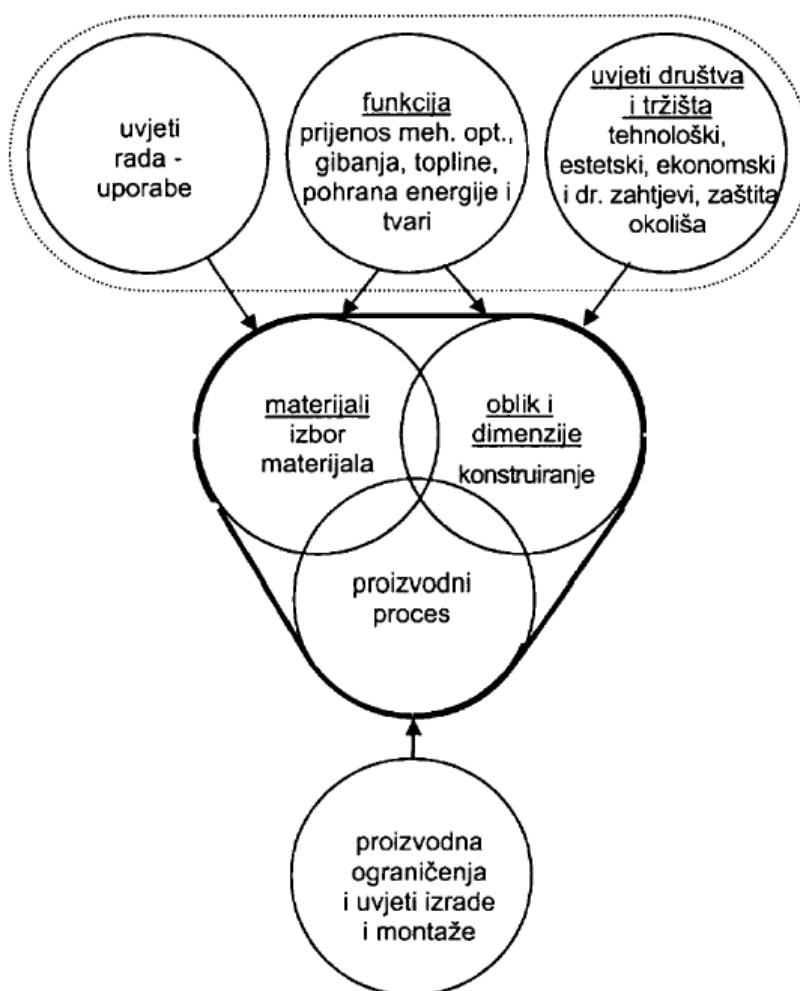
- Informacije iz već postojećih konstrukcija
 - „prepisivanje“ oznake materijala iz vlastite ili strane dokumentacije koji se već koristio za isti ili sličan proizvod.
- Kvalitativni ili "subjektivni" čimbenici
 - u ovu skupinu spadaju kriteriji izbora materijala koji su zasnovani na vlastitom iskustvu i procjenama, a ne na mjerljivim i brojčanim podacima. To su npr., procjene stupnja mehaničkog opterećenja, zahtjevine otpornosti na trošenje ili koroziju, dimenzionalni sklad proizvoda, procjena troškova izrade proizvoda različitim tehnološkim postupcima itd.
- Kvantitativni ili "objektivni" čimbenici
 - zahtjevi i svojstva za određeni materijal ili postupke proizvodnje koji se mogu mjeriti i brojčano izraziti. Najčešće su to mehanička svojstva i cijena (troškovi materijala i izrade).
- Postojeća ograničenja
 - određuju se prioritetni materijali za određenu proizvodnju na temelju internih propisa i normi. Ograničenja se mogu odnositi i na mogućnost

nabave nekog materijala, mogućnost lijevanja, zavarivanja i kovanja u vlastitom pogonu ili kod kooperanata.

1.3. Metodologija izbora materijala

Važna zadaća pri realizaciji neke konstrukcijske ideje je izbor prikladnog materijala. Da bi se odabrao prikladan materijal potrebno je razmotriti različite kriterije, zahtjeve i funkcije, koji se odnose na proizvodnju i uporabu proizvoda te zahtjeve koje nameće tržište. Razvoj proizvoda uključuje mnoge povezane aktivnosti koje se mogu svrstati u tri osnovne kategorije. To su konstrukcijsko oblikovanje, izbor materijala i izbor postupaka proizvodnje.

Međusobna povezanost osnovnih aktivnosti prikazana je na slici 3.



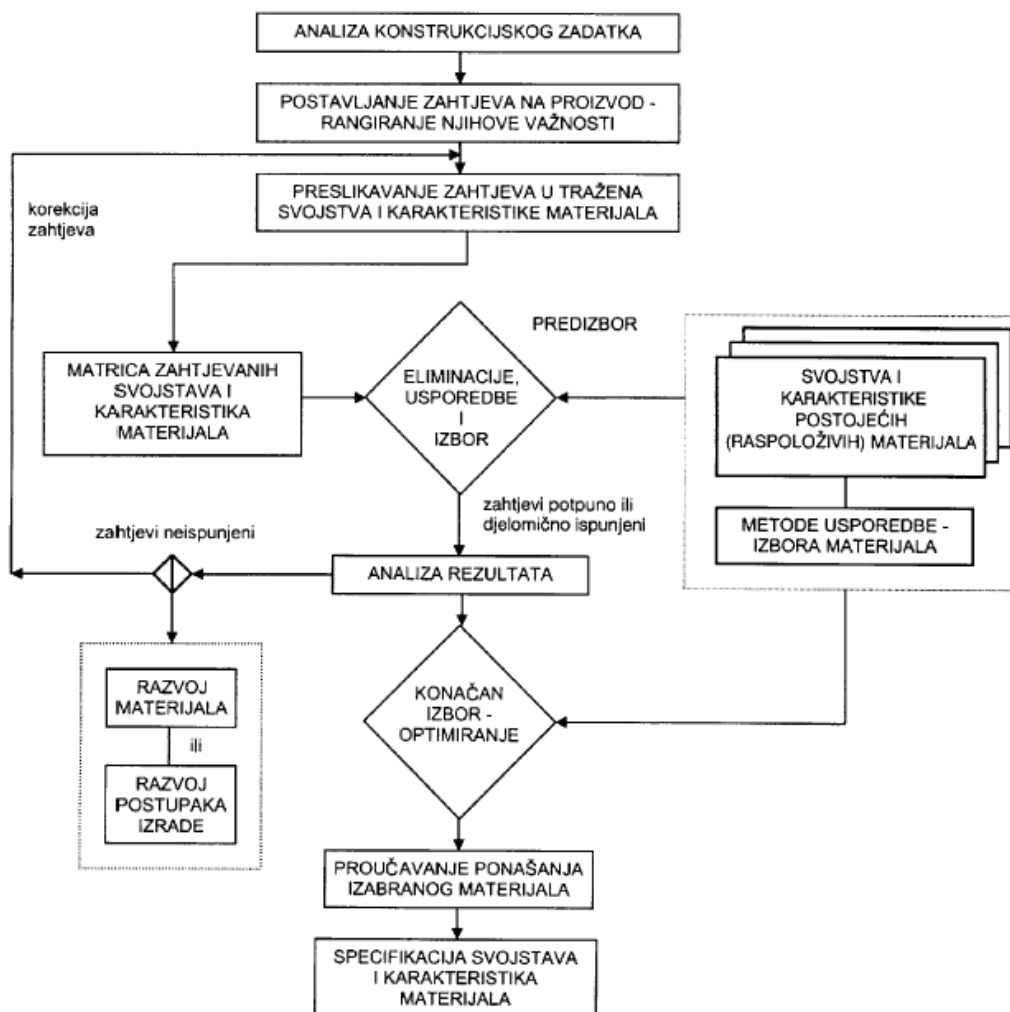
Slika 3. Povezanost konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupaka proizvodnje [1]

Konsturiranje postaje sve složeniji i odgovorniji postupak zbog strožih zahtjeva na svojstva proizvoda i ekonomičnost izrade te sve većeg broja proizvodnih postupaka i materijala. Odabrani materijal vrlo često ima odlučujući utjecaj na svojstva i ponašanje proizvoda.

Iako je iskustvo i dalje neophodno u pojedinim fazama odlučivanja, sve više se u praksi koristi metodički postupak izbora materijala. Opći postupak izbora materijala sadrži sljedeće faze:

- analiza konstrukcijskog zadatka;
- izlučivanje pripadajućih zahtjeva i kriterija vrednovanja materijala iz skupa zahtjeva i kriterija prema kojima se vrednuje proizvod;
- izbor i rangiranje kriterija te preslikavanje u svojstva potrebna za usporedbu materijala ili za vrednovanje proizvoda u pogledu materijala;
- izdvajanje neprikladnih materijala (po skupinama, vrstama ili tipovima);
- razrada varijanti rješenja - materijali u kombinaciji s konstrukcijskim i tehnološkim parametrima;
- analiza i vrednovanje pojedinih varijanata;
- konačan izbor optimalne varijante i njoj pridruženih materijala;
- oblikovanje izlaznih informacija o odabranim materijalima.

Dijagram na slici 4 prikazuje tok izbora materijala pri razvoju novog proizvoda.



Slika 4. Dijagram toka izbora materijala [1]

S obzirom da se zahtjevi proizvodnje često ne podudaraju s zahtjevima uporabe (funkcije i eksploataбилности), mora se ispunjenje pojedinih zahtjeva rangirati po važnosti. Razlikujemo dva tipa zahtjeva s obzirom na nužnost ispunjenja:

- nužno ispunjive ili invarijantne zahtjeve
- promjenjive ili varijantne zahtjeve – kod njih je dopušteno zadovoljenje u određenim toleriranim granicama.

Pri razradi varijantnih rješenja svakoj pojedinoj varijanti pridružuju se oni materijali koji najbolje zadovoljavaju posebne zahtjeve vezane uz konkretno rješenje. Ti zahtjevi su funkcionalni, proizvodni, eksploatacijski i ekonomski. Uz svaku varijantu vezan je konkretni

proizvodni postupak pa je tehnologičnost materijala (uz troškove) često odlučujući kriterij pri izboru materijala. U svakom koraku tijekom razvoja proizvoda može biti više skupina ili vrsta prikladnih materijala te je potrebno odrediti optimalni materijal s pomoću poznatih metoda i definiranih kriterija.

Za detaljniju analizu prilikom procesa izbora materijala posebno je važno:

- postaviti zahtjeve i kriterije izbora;
- definirati tražena svojstva i karakteristike;
- primijeniti znanstvene metode odlučivanja i optimiranja.

1.4. Osnovne skupine kriterija pri izboru materijala

Od pojave ideje o proizvodu pa do realizacije proizvoda javlja se niz kriterija vezanih uz materijale proizvoda. Dio kriterija odnosi se samo na svojstva materijala, npr.: električna ili toplinska vodljivost, magnetičnost, prozirnost, kemijska postojanost i sl. Drugi dio kriterija odnosi se na karakteristike proizvoda, npr.: mala masa, niska cijena, nosivost, trajnost i dr. U početnoj fazi izbora materijala trebaju se odrediti svojstva koja želimo da traženi materijal posjeduje čime olakšavamo odluku o izboru materijala unutar određenog skupa materijala. Svi kriteriji povezani uz materijal i izbor materijala pri razvoju proizvoda mogu se svrstati u sedam sljedećih skupina:

- FUNKCIONALNOST
- EKSPLOATABILNOST
- TEHNOLOGIČNOST
- EKOLOGIČNOST - RECIKLIČNOST I UNIŠTIVOST
- EKONOMIČNOST - RASPOLOŽIVOST, NABAVLJIVOST I CIJENA
- NORMIRANOST - STANDARDNOST
- ESTETIČNOST.

FUNKCIONALNOST I EKSPLOATABILNOST

To su kriteriji koji određuju funkciju proizvoda u eksploataciji, odnosno izvršenje njegovog zadatka. S obzirom da proizvod obavlja svoju funkciju kroz eksploataciju, kriteriji funkcionalnosti i eksploatabilnosti su usko povezani i ne mogu se samostalno analizirati.

Pri eksploataciji proizvoda moguća su neka neželjena ponašanja:

- promjene u dimenzijama i obliku proizvoda - prekomjerne elastične i plastične deformacije;
- narušavanje cjeline proizvoda - lom;
- neželjene pojave na površini proizvoda – mehaničko trošenje, korozija i sl..

Bolja ili slabija funkcionalnost i eksploatabilnost opisuju se karakterističnim kriterijima:

- nosivost,
- sigurnost i pouzdanost,
- trajnost
- prikladnost za održavanje i zamjenu...

Usporedba materijala i kvantifikacija navedenih kriterija provodi se preko sljedećih skupina svojstava materijala:

- fizikalno-kemijskim svojstvima materijala,
- mehaničkim svojstvima,
- tribološkim svojstvima,
- korozijskom postojanošću,
- postojanosti na djelovanje zračenja...

TEHNOLOGIČNOST

Kriterij koji sadrži elemente prikladnosti materijala za preoblikovanje, karakteristike postupaka proizvodnje, značajke opreme, ljudi i troškove izrade ili montaže.

S obzirom da procesi proizvodnje mijenjanju svojstva materijala, zahtjev tehnologičnosti treba shvatiti kao potrebu da se postigne točno propisana kvaliteta proizvoda. Prilikom toga potrebno je koristiti najjednostavnije i najjeftinije materijale i postupke proizvodnje. Pitanje koje se postavlja je: kada i kako primjeniti neki proizvodni postupak ili tehnologiju.

S obzirom na materijal i njegovo ponašanje u proizvodnji imamo sljedeće proizvodne zahtjeve, a time i proizvodna svojstva materijala:

- livljivost,
- rezljivost - obradljivosti odvajanjem čestica,
- sposobnost plastične deformacije (u toplom i hladnom stanju),
- zavarljivost i lemljivost,

- prikladnost za lijepljenje,
- prikladnost za modificiranje površine,
- toplinska obradljivosti...

Još jedan jako bitan kriterij je i trošak proizvodnje čiji iznos ovisi o vrsti materijala koji koristimo.

EKOLOGIČNOST - RECIKLIČNOST I UNIŠTIVOST

Kriterij koji obuhvaća zahtjeve koji se odnose na zaštitu okoliša, bolje iskorištenje otpadnog materijala ili proizvoda. Ovoj skupini kriterija pripadaju:

- sklonost materijala prirodnoj razgradnji,
- složenost tehnoloških postupaka za recikliranje i uništenje,
- negativan utjecaj na okoliš (otrovnost i dr.),
- mogućnost ponovnog uključivanja materijala u proizvodni proces,
- isplativost recikliranja i uništenja...

EKONOMIČNOST - RASPOLOŽIVOST, NABAVLJIVOST I CIJENA

Ovi kriteriji govore o stanju materijala na tržištu, a uglavnom se odnose na sljedeće:

- porijeklo materijala - uvozni, domaći;
- raspoložive vrste, stanja i dimenzije poluproizvoda na tržištu ili kod pojedinih proizvođača;
- kvaliteta materijala pojedinih proizvođača ili dobavljača:
- uvjeti nabave - rokovi, pouzdanost isporuke, potrebni atesti i tehnički uvjeti isporuke:
- cijena materijala i troškovi nabave.

NORMIRANOST - STANDARDNOST

U pravilu je bolje birati materijale normiranih svojstava, odnosno onih koji se lako mogu nabaviti i koji se uobičajeno proizvode. Za primjenu određenih vrsta materijala ili zadovoljenja specifičnih svojstava nužno je ispuniti određene zakone, propise, norme i preporuke. U ovom kriteriju nalaze se tehnička ograničenja, uvjeti primjene, uvjeti sigurnosti i zdravlja ljudi te zaštite okoliša.

ESTETIČNOST

Za što bolju konkurentnost na tržištu potrebno je da proizvod ima što zanimljiviji estetski izgled. To se manifestira dimenzionalnim skladom, bojom, sjajnošću, teksturom i sl. Ovaj kriterij se ne može mjerljivo (kvantitativno) izraziti zbog raznolikosti svakog pojedinog kupca, odnosno svaki pojedinac ima različitu percepciju „lijepog“. Materijal svojom izvornom bojom ili mogućnošću promjene boje i stanja površine može bitno utjecati na konačni izgled proizvoda.

S obzirom da se u realnoj situaciji ne mogu ispuniti svi zahtjevi, pokušava se kompromisno ispuniti nekoliko njih. Pri izboru materijala pokušava se dobiti najpovoljnije rješenje u postojećim uvjetima, odnosno neka optimalna kombinacija svojstava materijala. Uzevši to u obzir može se zaključiti da se izbor materijala svodi na traženje optimalnog materijala.

1.5. Ponašanje materijala, podaci i svojstva

Pomoću odgovarajućih kvantitativnih vrijednosti svojstava određuju se zahtjevi i kriteriji pri izboru materijala. Pritom se odabiru veličine kojima bi se što bolje i pouzdanije mogla provesti usporedba materijala i konačan izbor.

Često se kvantitativne veličine svojstava pogrešno pridružuju zahtjevima ili nedostaju. Zbog toga, pri odlučivanju o izboru materijala, koristimo se iskustvom i subjektivnim procjenama.

Podaci i znanja o svojstvima dobiveni su ispitivanjima i praćenjem materijala i proizvoda tijekom njegova praoblikovanja i preoblikovanja, odvajanja, povezivanja, prevlačenja, toplinske obrade, ili u eksploataciji.

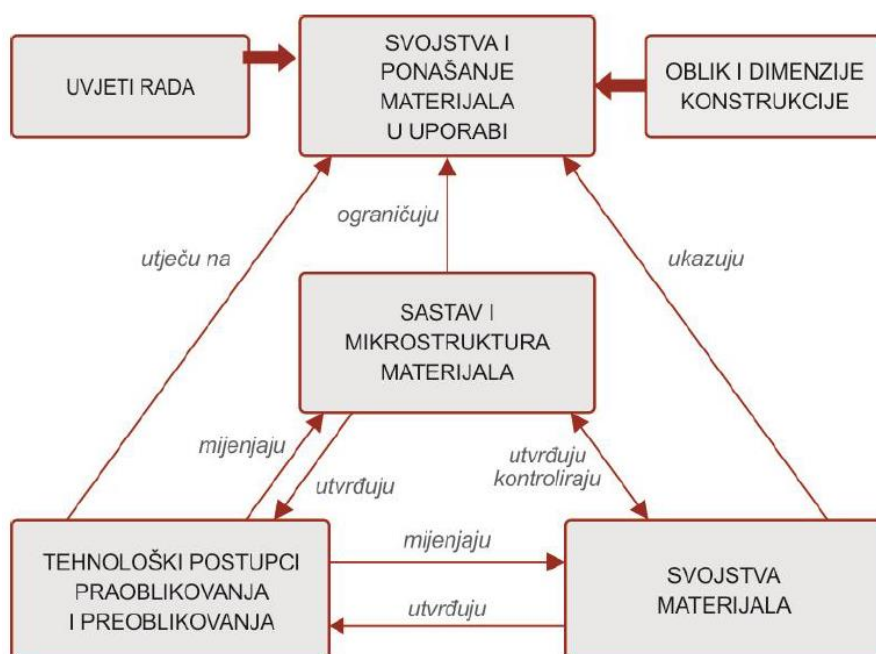
Podaci o materijalima mogu se svrstati u nekoliko skupina:

- podaci o sastavu materijala,
- podaci o mikrostrukturi,
- podaci dobiveni normiranim ispitivanjima epruveta,
- podaci dobiveni dogovorenim ispitivanjima epruveta,
- podaci za svojstva dobiveni ispitivanjima modela i prototipa proizvoda,
- podaci dobiveni praćenjem materijala u proizvodnji,
- podaci dobiveni ispitivanjima i praćenjem proizvoda u uporabi (eksploataciji),
- podaci dobiveni praćenjem tijekom regeneracije ili recikliranja materijala.

Najbolji podaci o materijalu dobiju se normiranim i dogovorenim laboratorijskim ispitivanjem uzoraka, epruveta ili ispitnih tijela iz poluproizvoda i gotovih dijelova. Time se dobiju podaci koji su usporedivi i od velike su važnosti za proračun konstrukcija i izbor materijala.

Slika svojstava i moguće ponašanje materijala upotpunjuje se podacima dobivenim iz praćenja pri izradi i uporabi koje dobijemo u obliku povratnih informacija.

Na slici 5 prikazani su utjecajni faktori na svojstva i ponašanje materijala.



Slika 5. Utjecajni faktori na svojstva i ponašanje materijala [1]

Svojstva materijala mogu se promatrati na razini tvari, razini materijala u poluproizvodima i razini materijala u gotovom proizvodu.

Svojstva tvari opisuju se nekim osnovnim konstantama, neovisnim o obliku i dimenzijama izratka. U ovoj kategoriji nalaze se svojstva koja se odnose na mehaničku otpornost materijala [modul elastičnosti (E), modul smičnosti (G), Poissonov omjer (ν)] te fizikalna svojstva (gustoća (ρ), toplinska, električna, magnetska, akustična, optička svojstva). Vrijednosti navedenih svojstava vrlo su prikladne za predizbor skupina materijala zbog toga što su gotovo nepromjenljive i dobro su usporedive.

Drugu skupina najčešće rabljenih podataka o svojstvima materijala dobivena je ispitivanjem poluproizvoda. S obzirom da je poluproizvod materijal koji ima još nekoliko stupnjeva

prerade i obrade dok ne poprими konačan oblik, na njegova svojstva najviše utječu postupci praoblikovanja i preoblikovanja materijala.

Bitni faktori o kojima ovise vrijednosti ispitivanja svojstava materijala su:

- mikrostruktura i makrostruktura materijala,
- geometrija ispitnog uzorka,
- visina temperature pri ispitivanju,
- ostali uvjeti ispitivanja - okolni medij, trajanje i način opterećenja...

Treća skupina pokazatelja koji govore o promjeni sastava, strukture i svojstava tijekom eksploatacije materijala su svojstva i ponašanje materijala u gotovom proizvodu. Velik dio ponašanja materijala samo je iskustveno predvidljiv zbog kompleksnosti i poteškoća pri utvrđivanju uvjeta rada, utjecaja postupaka proizvodnje i montaže na ponašanje u radu.

Prema [1] sva svojstva i karakteristike materijala mogu se svrstati u sljedeće skupine:

1. SASTAV I MIKROSTRUKTURA MATERIJALA

- elementarni kemijski sastav
- kemijska struktura
- mikrostrukturne karakteristike
- makrostrukturne karakteristike

2. FIZIKALNA SVOJSTVA

- opća: gustoća, talište, viskoznost...
- električna: električna vodljivost, električni otpor, dielektrična konstanta...
- magnetska
- toplinska, termodinamička: topl. vodljivost, topl. rastezljivost, spec. toplinski kapacitet, emisivnost, otpornost na gorenje...
- optička: indeks loma, prozirnost, reflektivnost...
- akustična: prigušenje zvuka
- nuklearna: vrijeme poluraspada, stabilnost...

3. MEHANIČKA SVOJSTVA

- opća: modul elastičnosti, modul smičnosti, Poissonov omjer, lomna žilavost...
- svojstva dobivena ispitivanjem uz statičko kratkotrajno opterećenje (vlak, tlak, savijanje, torzija): granica razvlačenja, čvrstoća, istezljivost, suženje poprečnog presjeka...
- tvrdoća
- svojstva dobivena ispitivanjem uz promjenjivo opterećenje (vlak-tlak, savijanje, torzija): vremenska dinamička izdržljivost, dinamička izdržljivost
- svojstva dobivena ispitivanjem uz udarno opterećenje: udarni rad loma (Charpy, Izod), prijelazna temperatura...
- svojstva puzanja i relaksacije: granica puzanja, statička izdržlj.

4. OTPORNOST NA KEMIJSKE, FIZIKALNE I BIOLOŠKE UTJECAJE

- otpornost na medije i tvari u dodiru: otpornost na opću koroziju, interkristalnu koroziju, napetosnu koroziju, vodikovu krhkost, intenzivnu oksidaciju...
- otpornost na žive organizmima - biološka otpornost
- otpornost na UV zračenje
- uništivost kemijskim, fizikalnim ili biološkim djelovanjima

5. OTPORNOST NA TROŠENJE – TRIBOLOŠKA SVOJSTVA

- otpornost na adheziju
- otpornost na abraziju
- otpornost na umor površine
- otpornost na tribokemijsko trošenje

6. PROIZVODNA SVOJSTVA

- livljivost
- oblikovljivost deformiranjem – kovkost – gnječivost
- obradljivost odvajanjem čestica – rezljivost
- zavarljivost
- prikladnost za lijepljenje

- mogućnost zaštite površine
- toplinska obradljivost

7. TRŽIŠNE KARAKTERISTIKE MATERIJALA I POLUPROIZVODA

- komercijalne i standardne oznake i nazivi materijala
- stanja, oblici, dimenzije, tolerancije
- uvjeti i troškovi nabave
- cijena materijala

Svako svojstvo ili njihova kombinacija i kvantitativni pokazatelj svojstava mogu se izraziti na bilo koji od sljedeća četiri načina:

- kao jednoznačna mjerena veličina
- opisnom karakterizacijom
- funkcijama, dijagramima i slikama
- kao kombinacija svojstava - pokazatelji vrednovanja materijala

1. Jednoznačne mjerene veličine

Tu spadaju ispitivanjem dobivene pojedinačne vrijednosti za neko svojstvo. To su mehanička i fizikalna svojstva (modul elastičnosti, granica tečenja, vlačna čvrstoća, istezljivost, dinamička izdržljivost, tvrdoća, toplinska vodljivost, toplinska rastezljivost...). Zbog dobre usporedivosti podataka i za različite skupine materijala rabe se za dimenzioniranje dijelova i odabir materijala.

2. Opisna karakterizacija

Svojstva se izražavaju riječima ili ocjenama što je dosta općenito i može biti vrlo neprecizno. Za neka svojstva (tehnološka, otpornost na koroziju i otpornost na trošenje) to je gotovo jedini mogući način kvantifikacije iz razloga što su teško mjerljiva.

Kod opisne karakterizacije ocjene svojstava se najčešće iskazuju sljedećim riječima ili brojevima: .

ocjena 5 - izvrstan ili posebno prikladan,

ocjena 4 - vrlo dobar ili vrlo prikladan,

ocjena 3 - dobar ili prikladan,

ocjena 2 - dovoljan ili uvjetno prikladan,

ocjena 1 ili 0 - nedovoljan ili neprikladan.

Ocjene su često vrlo subjektivne pa je upitna pouzdanost takvih ocjena jer ovise o tome tko ih je i na osnovu kojih spoznaja i podataka ustanovio.

3. Prikazi svojstava i ponašanja materijala funkcijama, dijagramima i slikama

Ovo je najčešći način iskazivanja svojstava i daje najviše informacija o ponašanju materijala. To je višeznačna karakterizacija zbog s velikim brojem podataka i informacija. Neki od takvih prikaza su: dijagram "naprezanje—deformacija", dijagram puzanja, prikazi trošenja i korozije u vremenu itd.

Danas se koristi i parametarsko kvantificiranje ovisnosti pojedinih svojstava o temperaturi, tlaku, trajanju opterećenja i drugim utjecajima. Time se olakšava pohrana funkcija u baze podataka i provođenje proračuna.

Ukoliko su sastav i mikrostrukturni parametri materijala poznati, neka svojstva se mogu približno izračunati s pomoću empirijskih izraza.

4. Kombinacija svojstava -- pokazatelji vrednovanja materijala

Pokazatelji vrednovanja materijala dobivaju se logičkom analizom ili razmatranjem izraza za proračunavanje konstrukcijskih dijelova. Tako se npr. omjer modula elastičnosti i gustoće uobičajeno naziva „specifična krutost“, a omjer čvrstoće i gustoće „specifična čvrstoća“.

Pri definiranju svojstava materijala za izbor, kontrolu i primjenu kao pomagalo se može koristiti katalog svojstava u kojem se mogu naći opisi pojedinih svojstava i mjerljivih veličina. Za svako svojstvo definirani su sljedeći elementi:

- naziv, oznaka i jedinica;
- definicija i kratak opis načina utvrđivanja/ispitivanja;
- način izražavanja vrijednosti;
- značenje i primjena;
- literaturni izvori i norme metoda ispitivanja;
- napomene.

2. KVANTITATIVNE METODE IZBORA MATERIJALA [1]

U težnji za što objektivnijim odlučivanjem razvijeno je nekolicina kvantitativnih metoda izbora materijala. Osim što se koriste pri izboru materijala, većina njih služi i za vrednovanje konstrukcijskih varijanti cijelog proizvoda.

Da bi se uopće mogle primjeniti kvantitativne metode nužno je imati na raspolaganju brojčano iskazane vrijednosti svojstava materijala u obliku mjerenih ili procijenjenih veličina (ocjena). Rezultati izbora poprilično ovise o pouzdanosti i statističkom rasipanju tih podataka. Zbog što veće pouzdanosti treba uzimati podatke iz više izvora, a prikupljene podatke je potrebno statistički obraditi.

Sam način izbora optimalnog materijala ovisi o broju i važnosti postavljenih zahtjeva i kriterija. U slučaju kada postoji mali broj zahtjeva s velikom važnošću, težište se stavlja na kvalitativnu i kvantitativnu analizu svojstava i ponašanja manjeg broja materijala koji ulaze u uži izbor. Kvantitativne metode odlučivanja koriste se ponajprije kod velikog broja traženih svojstava, jer se može očekivati relativno puno prihvatljivih materijala.

Za sve načine odlučivanja karakteristična je usporedba traženih i postojećih vrijednosti materijala.

Prema složenosti i po redoslijedu odlučivanja razlikuju se tri načina usporedbe:

- 1) traži se zadovoljenje neke minimalne ili maksimalne tražene vrijednosti, ili eliminacija preko nul – zahtjeva (kao što su npr. cijena, masa, vrijeme nabave, toplinska vodljivost...) – ovaj način usporedbe prikladan je za invarijantne zahtjeve
- 2) usporedba preko prekrivanja polja toleriranih vrijednosti – taj je način usporedbe prikladan za varijantne zahtjeve

Pri usporedbi može se dogoditi:

- a) da nema ni jednog materijala koji potpuno ispunjava zahtjeve i u tom slučaju je potrebno ponovno analizirati zahtjeve ili razviti nove materijale i proizvodne postupke
 - b) da jedan materijal potpuno ispunjava sve postavljene zahtjeve
 - c) da više materijala potpuno ili djelomično ispunjavaju osnovne zahtjeve. U praksi je ovo najčešći slučaj, a optimalno rješenje se traži preko trećeg načina usporedbe.
- 3) Traži se minimalna ili maksimalna vrijednosti funkcije cilja koja je unaprijed definirana. Funkcija cilja se može definirati i kao pokazatelj vrednovanja.

U općem obliku funkcija cilja (F_i) je zbroj omjera postojećih (X_i) i traženih vrijednosti (Y_i) svih relevantnih svojstava, pri čemu se svaki omjer množi s faktorom važnosti (B_i).

$$F_i = \sum_{i=1}^n B_i * \frac{X_i}{Y_i} \rightarrow \text{maks.} \quad (1)$$

Kako bi se poništio utjecaj različitih apsolutnih vrijednosti svojstava, treba ih skalirati, tj. svesti na red veličina u rasponu od 1 do 10 ili od 1 do 100. Normalizacija ili skaliranje pojedine vrijednosti provodi se u odnosu na minimalnu ili maksimalnu vrijednost uspoređivanjem materijala prema zahtjevanim vrijednostima.

Faktorom važnosti (B_i) određuje se relativna važnost pojedinog zahtjeva u odnosu na sve ostale. Vrijednost pojedinih faktora važnosti je između 0 i 1, a zbroj svih faktora važnosti mora biti jednak 1.

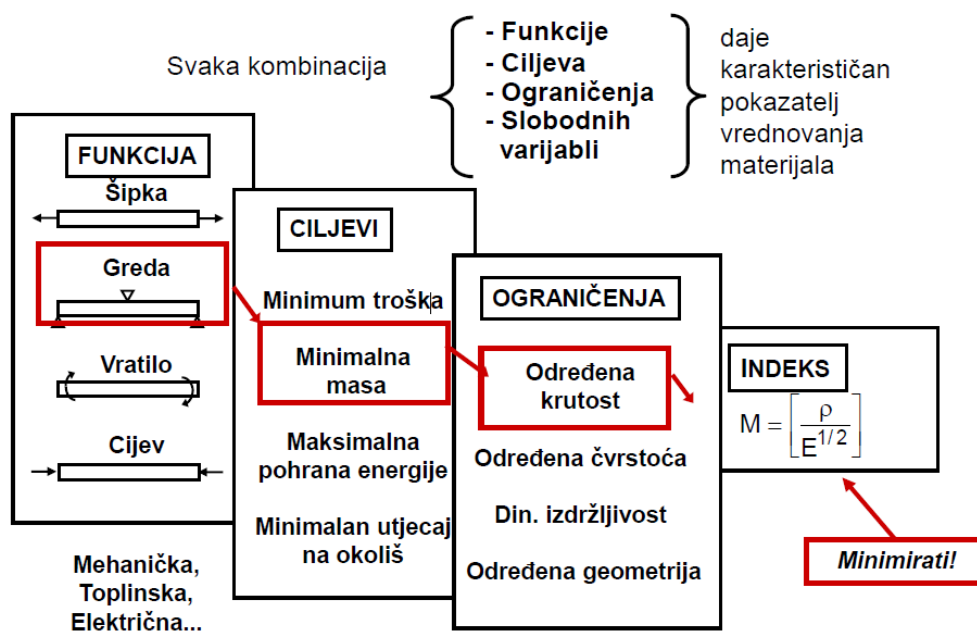
Faktore važnosti moguće je odrediti na dva načina – na temelju subjektivne procjene važnosti pojedinih svojstava ili s pomoću digitalno-logičke metode, relativno objektivne metode koja je osobito prikladna kod većeg broja zahtjeva.

Kod digitalno-logičke metode uspoređuje se svako svojstvo sa svakim, važnijem svojstvu se pridružuje 1, a manje važnom 0. Ukupan broj pitanja za „n“ zahtjeva biti će $n(n-1)/2$. Faktor važnosti jednak je omjeru pozitivnih odluka za određeno svojstvo i ukupnog broja pitanja. Ovakvim pristupom moguće je složeni problem rastaviti na niz pojedinačnih što pojednostavljuje rješenje.

Za digitalno-logičku metodu karakteristično je da su rezultati bolji, što je broj zahtjeva veći.

Funkcija cilja se može izraziti i preko pokazatelja vrednovanja. Kod njih se za unaprijed definirana svojstva materijala određuju neke logične kombinacije i odnose se na neki kriterij vrednovanja: masa, čvrstoća, krutost i sl., To vrijedi za poznate oblike dijelova i poznate načine opterećenja. Ovi izrazi nastaju na temelju različitih proračuna zasnovanih na teoriji čvrstoće i mehanike loma, vibracija, prijenosa topline i mase i dr.

Slika 6 prikazuje shemu specifikacije pokazatelja vrednovanja.



Slika 6. Shema specifikacije pokazatelja vrednovanja [1]

3. IZBOR MATERIJALA NOGOMETNE LOPTE

3.1. Povijest nogometnih lopti

Lopta je objekt sferičnog oblika čija je veličina, izgled, materijal i masa određena sportom za koji se koristi. Lopta je nešto što obilježava djetinjstvo skoro svakog čovjeka. Prve nogometne lopte bile su svinjski ili kravlji mjehuri. Napuhani svinjski mjehur prikazan je na slici 7 [2]. Sljedećih dvije tisuće godina lopta se izrađivala od životinjske kože sve do 1855. Godine, kada je izumitelj vulkanizirajuće gume Charles Goodyear, izradio prvu gumenu nogometnu loptu. Lopta se nakon toga malo mijenjala. Problem s kožnom loptom bio je taj što je prilikom kišnog vremena upijala veliku količinu vode, zbog čega bi joj se povećala masa. Takva lopta bila je vrlo teška za dodavanje i driblanje tijekom utakmice. Iako su se prve sintetičke lopte pojavile krajem 60-ih godina, tek je 80-ih sintetička koža zamijenila u potpunosti onu prirodnu. To je ujedno i početak modernih lopti kakve se i danas uglavnom proizvode [3].

U nastavku je prikazan povijesni razvoj Adidas lopte na nogometnim svjetskim prvenstvima [4,5,6].



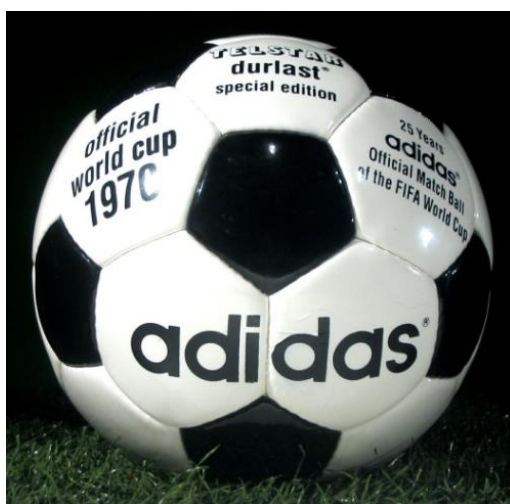
Slika 7. Napuhani svinjski mjehur [2]

1970. SP Meksiko – Adidas Telstar

Kao i sve ostale lopte tada, Adidasova lopta Telstar bila je u potpunosti načinjena od kože, ali za razliku od ostalih lopti, imala je 32 ručno povezana panela (12 crnih peterokuta i 20 bijelih šesterokuta). Revolucionarni dizajn Telstara ispisao je nogometnu povijest. Bila je to prva bijela nogometna lopta dekorirana crnim peterokutima.

Mexico 1970. bilo je je prvo Svjetsko prvenstvo koje se izravno prenosilo na televiziji, a revolucionarni dizajn Telstara, ime izvedeno iz “Star of Television”, učinio je loptu još vidljivijom na crno-bijelom ekranu. Sve do danas, Adidasov Telstar ostao je prototip svih nogometnih lopti.

Na slici 8 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 1970. godine.



Slika 8. Adidas Telstar [4]

1974. SP Njemačka – Adidas Telstar i Adidas Chile

Na Svjetskom prvenstvu 1974. u Njemačkoj korištene su dvije Adidasove nogometne lopte. Telstar se ponovo pojavio, ovoga puta s novim, crnim logom branda, umjesto prijašnjeg zlatnog. Na temelju Telstarovog uspjeha, Adidas je proizveo novu, potpuno bijelu loptu – Adidas Chile. Materijali i tehnike korišteni za proizvodnju Telstara i Chilea bili su identični onima korištenim četiri godine ranije.

Na slici 9 prikazane su službene lopte sa svjetskog prvenstva 1974. godine.



Slika 9. Adidas Telstar i Adidas Chile [4]

1978. SP Argentina – Adidas Tango

1978. dogodila se revolucija u dizajniranju nogometnih lopti kada je predstavljen Adidas Tango. Još jednom, Adidas je proizveo nešto što će postati klasik u dizajniranju nogometne lopte. Dvadeset panela s “trijadama” tvorilo je optičku iluziju 12 identičnih krugova. Za sljedećih pet Svjetskih prvenstava dizajn nogometne lopte bazirao se na dizajnu Adidas Tanga. Tango se odlikuje svojom voodopornošću, a inspiriran je dubokom strašću, emocijama i elegancijom Argentine.

Na slici 10 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 1978. godine.



Slika 10. Adidas Tango [4]

1982. SP Španjolska – Adidas Tango Espana

Prvotni izgled Tanga iz 1978. neznatno je promijenjen 1982. Pa ipak loptu Tango España karakterizira velika tehnička inovacija. Tango España je prva lopta napravljena od mješavine kože i sintetičkog materijala. Imala je poliuretansku prevlaku kako bi se postigla učinkovitija otpornost na vodu. To je drastično smanjilo upijanje vode i tako minimiziralo prirast mase lopte tijekom igre u nepovoljnim, kišnim vremenskim uvjetima.

Na slici 11 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 1982. godine.



Slika 11. Adidas Tango Espana [4]

1986. SP Meksiko – Adidas Azteca

Nogometna lopta za Svjetsko prvenstvo 1986. revolucionirala je nogomet i tehniku proizvodnje nogometnih lopti. Adidas Azteca bila je prva potpuno sintetička nogometna lopta, izrađena u slojevima. Svaki sloj je imao različita, točno definirana svojstva što je lopti dalo potrebnu čvrstoću i elastičnost, nepromjenjivost oblika i maksimalnu voodootpornost. S nikada prije postignutim performansama na tvrdom tlu i u mokrim uvjetima, Azteca predstavlja veliki korak u poboljšanju igre. Njezin elegantan i lijepo dekoriran dizajn, inspirirani su astečkom arhitekturom.

Na slici 12 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 1986. godine.



Slika 12. Adidas Azteca [4]

1990. SP Italija – Adidas Etrusco Unico

Ime i dizajn inspirirani su čudesnom poviješću i umjetnošću starih Etrušćana. Tri etrušćanske lavlje glave ukrašavaju svaku od 20 trijada na Tangu. Lopta je ponovno u cijelosti proizvedena od potpuno sintetičkih slojeva. Jedan sloj načinjen je od lateksa radi postizanja dimenzijske stabilnosti i mehaničke otpornosti. Sloj kloroprena (sintetička guma) čini loptu maksimalno vodootpornom, a vanjski pokrov od poliuretana daje izvrsnu otpornost na abraziju i dobra elastična svojstva.

Na slici 13 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 1990. godine.



Slika 13. Adidas Etrusco Unico [4]

1994. SP SAD – Adidas Questra

Lopta s ovog svjetskog prvenstva nazvana je Questra što označava potragu SAD-a za zvijezdama („quest for the stars“). Sama lopta razvijena je u Francuskoj, a temeljito su je testirali nogometni timovi i igrači u Europi i SAD-u.

Vanjski sloj ove lopte načinjen je od poliuretana što je doprinijelo njezinoj izdržljivost. Ispod sloja poliuretana nalazio se sloj ekspandiranog polistirena. To je loptu učinilo vodootpornijom, bržom, mekanijom pri udarcu i lakše ju je bilo kontrolirati.

Na slici 14 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 1994. godine.



Slika 14. Adidas Questra [4]

1998. SP Francuska – Adidas Tricolore

Adidas Tricolore bila je prva višebojna nogometna lopta inspirirana francuskom zastavom i nacionalnim bojama (Tricolore) te francuskim tradicionalnim nacionalnim simbolima i simbolima Nogometne Federacije. Osim toga, Adidas Tricolore imala je poboljšani sloj sintetičke pjene. Pjena se sastojala od plinom punjenih mikro mjehurića koji su ravnomjerno raspodijelili energiju kada je lopta udarena. Sintetička pjena poboljšala je izdržljivost lopte i učinila je još boljom za igru.

Na slici 15 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 1998. godine.



Slika 15. Adidas Tricolore [4]

2002. SP Koreja i Japan – Adidas Fevernova

Adidas Fevernova, nogometna lopta na Svjetskom prvenstvu iz 2002., bila je prva koja je prekinula tradicionalni Tango dizajn predstavljen 1978. Kompletan izgled ove lopte, uključujući i boje, inspirirani su azijskom kulturom. Lopta se sastojala od šest slojeva i premaza počevši s unutarnjim slojem od lateksa. Zatim je slijedilo troslojno Raschelovo pletivo, sloj sintetičke pjene, sloj poliuretana i na kraju prozirni poliuretanski premaz koji je otporan na abraziju.

Na slici 16 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 2002. godine.



Slika 16. Adidas Fevernova [4]

2006. SP Njemačka – Adidas Teamgeist

Nogometnom loptom Adidas Teamgeist predstavljen je radikalno novi dizajn 14-panelne konfiguracije koja je formirala glatku i savršeno okruglu površinu koja je igračima omogućila veću točnost i kontrolu. Lopta je ukrašena motivom trofeja svjetskog prvenstva u tradicionalnim bojama njemačke reprezentacije (crno-bijela kombinacija) sa zlatnim rubom. Njezino ime, Teamgeist, inspirirano je karakteristikom koju svaki tim mora imati ako želi pobjedu - timski duh.

O lopti Teamgeist, kao tehničkom čudu, dovoljno govori podatak da se u njenoj izradi koristi posebna pjena u kojoj se nalazi čak osam milijuna mikrokuglica. Te mikrokuglice omogućuju da se ova lopta, u odnosu na prethodne lopte, nakon udarca puno brže vraća u prvobitni oblik. To je svojstvo odlučujuće za optimalnu putanju lopte. Zbog patentirane slijepljene površine Teamgeist i za vrijeme najveće kiše ne upija vodu, čime lopta ne postaje teža te je s njom lakše baratati, a smanjuje se i mogućnost ozljeda igrača.

Na slici 17 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 2006. godine.



Slika 17. Adidas Teamgeist [4]

2010. SP Južna Afrika – Adidas Jabulani

Lopta s ovog svjetskog prvenstva nazvana je Jabulani, što na Zulu jeziku znači „proslaviti“. Ukrašena je s 11 boja što simbolizira 11 adidasovih lopti na prethodnim Svjetskim prvenstvima. Pri izradi ove lopte prvi put se koristila tehnologija „grip and groove“. Paneli različitih oblika spajaju se pod djelovanjem tlaka i temperature i uvijaju oko prethodnog sloja

čime se poboljšavaju aerodinamička svojstva lopte. Sastavljena od samo osam 3-D panela, povezanih u obliku sfere, ova lopta je savršeno zaokružena i preciznija nego ijedna prije. Zračne brazde stvaraju jasno vidljiv profil površine lopte što omogućuje do sada neviđene “leteće” karakteristike. Svojstva i performanse Adidas Jabulani lopte potvrđene su sveobuhvatnim testovima na Loughborough Sveučilištu u Engleskoj i brojnim provjerama u zračnom tunelu i Adidas nogometnom laboratoriju u Scheinfeldu, u Njemačkoj.

Na slici 18 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 2010. godine.



Slika 18. Adidas Jabulani [4]

2014. SP Brazil – Adidas Brazuca

Brazuca, što znači „brazilski“, a odnosi se na brazilski način života, najnaprednija je adidasova lopta u povijesti. Dizajn Brazuce u vibrantnim bojama i trakama iscrtanim na lopti simbolizira tradicionalne brazilske narukvice dobrih želja (fita do Senhor do Bonfim da Bahia) te dočarava dinamičnost i strast Brazila. Brazuca donosi inovacije u strukturi površine te jedinstvenu simetriju ostvarenu sa šest identičnih panela, što omogućava još bolju kontrolu lopte, njezinu stabilnost i aerodinamiku na samom terenu. Paneli se izrađuju od poliuretana toplinski su spojeni s ciljem smanjenja apsorpcije vode. Ispod panela je nekoliko slojeva od poliamida, a u unutrašnjosti je mjehur od kopolimera poli(izobutena) – IIR, poznatog pod nazivom butilna guma.

Na slici 19 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 2014. godine.



Slika 19. Adidas Brazuca [4]

2018. SP Rusija – Adidas Telstar 18

Nogometna lopta Telstar 18 kreirana je po uzoru na prvu Adidas Telstar loptu koja je korištena 1970. godine na Svjetskom prvenstvu u Meksiku. Klasik je oživljen novim dizajnom panela s metalik printom i efektom grafičke teksture, uz najmoderniju tehnologiju u proizvodnji lopte. Napravljena je kako bi osigurala učinkovitost na svim podlogama (trava, parket, beton...), čime se Telstar 18 razlikuje od prethodnih inačica. Prvi put je u povijesti, u službenu nogometnu loptu Svjetskog prvenstva, ugrađena tehnologija NFC čipa, čime je Telstar 18 postala najinovativnija lopta ikada. Čip omogućava interakciju s loptom pomoću pametnog telefona, pri čemu korisnik dobiva pristup ekskluzivnom sadržaju i personaliziranim informacijama.

Na slici 20 prikazana je službena lopta sa svjetskog prvenstva 2018. godine.

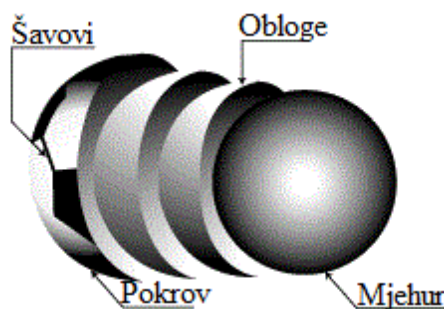


Slika 20. Adidas Telstar 18 [4]

3.2. Konstrukcija nogometne lopte [7,8,9]

Četiri glavne komponente nogometne lopte su pokrov, šavovi, obloge i mjehur. Razumijevanje funkcije tih komponenti i njihovih uloga pomaže pri odabiru materijala za svaku od njih kako bi se zadovoljili postavljeni zahtjevi za savršenu loptu.

Na slici 21 prikazana je slojevita konstrukcija lopte.



Slika 21. Shematski prikaz konstrukcije lopte [7]

Pokrov

Vanjski pokrov je dio nogometne lopte čija je glavna funkcija zaštita od trošenja i postizanje zadovoljavajućeg estetskog izgleda.

Površina današnjih nogometnih lopti ili pokrov izrađen je od sintetičke kože, a ne prirodne kao što je to bilo u prošlosti. Prirodna koža ima tendenciju apsorpcije vode što uzrokuje povećanje mase lopte. Sintetička koža je obično izrađena od poliuretana (PU) ili poli(vinil klorida) (PVC).

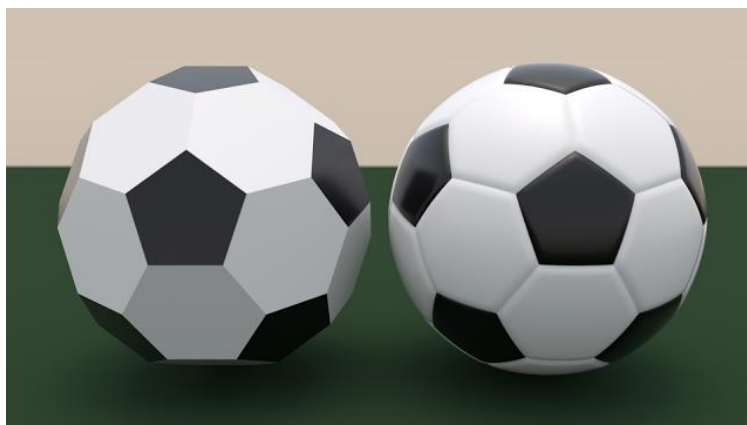
Poli(vinil klorid) je pristupačniji i može biti izdržljiviji od poliuretana. PVC je otporan na udarce i obično se koristi za nogometne lopte za treniranje. Poliuretanska lopta je u pravilu mekša od lopte izrađene od PVC-a i daje bolji osjećaj pri dodiru sa stopalom. Treba imati na umu da sve PU i sve PVC lopte nisu jednake te da postoje različite razine kvalitete i PVC-a i PU-a te različite tehnike konstrukcije lopte.

Postoje mnoge vrste sintetičke kože koje se koriste za izradu pokrova nogometnih lopti, a na tržištu se mogu naći pod različitim nazivima (AI-2000, japanski Teijin Cordley, Mircofiber, engleski Porvair, Korejski Ducksung, Art Pakistan umjetne kože i PVC). Najbolje nogometne lopte koje se koriste na velikim natjecanjima imaju pokrov napravljen od AI-2000, Cordley, Ducksung ili Mircofiber umjetne kože.

Pokrov lopte nastaje spajanjem različitih segmenata koji mogu biti 2D i 3D, a nazivaju se paneli. Broj i izgled panela varira za svaki dizajn lopte.

U profesionalnim utakmicama najčešće se koristi lopta s 32 panela (12 peterokuta i 20 šesterokuta). Kad je lopta napuhana, spojeni paneli trebaju poprimiti oblik što sličniji savršenoj kugli.

Na slici 22 prikazana je klasična crno-bijela lopta s 32 panela u ispuhanom i napuhanom stanju.



Slika 22. Lopta s 32 panela [8]

Ostali tradicionalni dizajni su konstrukcije od 18 i 26 panela, koje se koriste u raznim profesionalnim ligama, uključujući američku, škotsku i englesku ligu.

Manje panela na nogometnoj lopti znači manje šavova zbog čega lopta manje upija vodu i ima okrugliji oblik.

Paneli mogu biti spojeni:

- Šivanjem
 - Najkvalitetnije lopte su povezane poliesterskim ili sličnim koncem. Ručno zašivene lopte imaju čvršće i snažnije šavove. Za šivanje nekih lopti koristi se i poliester ojačan aramidnim vlaknima. Najskuplje lopte su ručno zašivene, dok su one iz srednjeg cjenovnog ranga strojno zašivene.
- Lijepljenjem
 - Kod manje kvalitetnih lopti i kod lopti za treninge paneli su zalijepljeni s oblogom. Ovakve lopte koštaju manje od zašivenih.
- Toplinski povezani

- Paneli se međusobno povezuju ljepilom pri visokoj temperaturi i uz djelovanje povišenog tlaka. Koriste se posebna ljepila koja povećavaju izdržljivost i otpornost na vodu. Primjer takvih lopti je Roterio lopta korištena na europskom prvenstvu 2004. i Jabulani sa svjetskog prvenstva iz 2016. godine.

Obloga

Obloga se uvijek sastoji od nekoliko slojeva postavljenih između pokrova i mjehura. Debljina obloge jako utječe na kvalitetu nogometnih lopti. Slojevi obloge proizvode se od poliestera i/ili vezanog (laminiranog) pamuka kako bi se dobila potrebna čvrstoća, postojanost oblika i elastičnost lopte. Profesionalne nogometne lopte obično imaju četiri ili više slojeva obloge. Promotivne i lopte za trening često su konstruirane s manje slojeva. Obloga pomaže lopti zadržati oblik i elastičnost tijekom njezinog životnog vijeka. Mnoge nogometne lopte imaju i sloj polimerne pjene za dodatnu podatnost i kontrolu lopte.

Na slici 23 je realni prikaz konstrukcije lopte.



Slika 23. Konstrukcija nogometne lopte [8]

Mjehur

Mjehur je unutarnji dio lopte koji zadržava zrak. Najčešće je napravljen od lateksa ili butilne gume.

Mjehur od butilne gume je izdržljiv i dobro zadržava zrak. Nedostatak je da se lako deformira pa je manje otporan na udarce.

Lateks je zbog svoje reakcije prilikom udarca i bolje površinske napetosti bolji izbor na profesionalnim natjecanjima. Mjehur od lateksa nije potpuno nepropusan pa se mora češće pumpati, što je njegov osnovni nedostatak. Također, nije tako mehanički izdržljiv kao butilna guma.

Mjehuri se rade i od prirodnog lateksa koji daje najbolji osjećaj kod igrača, ali zbog prisutnih mikropora, zrak polako izlazi van te se treba češće pumpati (barem jednom tjedno).

Ugljični lateks mjehuri, kao što ime sugerira, sadrže ugljični prah koji zatvara mikropore i tako sprječava brzi gubitak zraka. Ovo daje mekši, bolji osjećaj i odgovarajuće odskakanje.

Za izradu mjehura se može koristiti i poliuretan.

Šavovi

Paneli nogometne lopte povezani su šavovima.

Paneli se na profesionalnoj nogometnoj lopti uglavnom šivaju poliesterom, izdržljivim i neupijajućim materijalom. Aramidni šavovi se također mogu koristiti zbog bolje izdržljivosti i otpornosti na vodu.

Kod nekih današnjih nogometnih lopti paneli nisu spojeni šivanjem. Umjesto toga paneli se lijepe toplinskim zagrijavanjem. Na važnijim natjecanjima kao što je svjetsko prvenstvo takve lopte su danas uobičajne, jer su lopte bez šavova lakše i preciznije.

Ventil

Ventil je mala struktura slična cjevčici kroz koju se zrak upuhuje prilikom pumpanja mjehura. Zbog sposobnosti zadržavanja zraka najčešće se u nogometne lopte ugrađuju ventili od butilne gume. Ovaj gumeni materijal se zbog dobre elastičnosti lako otvara i brzo zatvara kada je igla za napuhivanje umetnuta ili uklonjena.

Danas se još koriste i silikonski ventili koji omogućuju glatko umetanje igle za pumpu i još veću zaštitu od gubitka zraka.

Na slici 24 prikazani su uobičajeni materijali za dijelove nogometne lopte.



Slika 24. Materijali za dijelove lopte [9]

3.3. Svojstva slojeva nogometne lopte

Jedan od prvih koraka pri izboru materijala jest postavljanje zahtjeva i preslikavanje tih zahtjeva u konkretna svojstva. S obzirom da se lopta sastoji od više dijelova, zahtjevi i svojstva su definirani za svaki dio.

Za pokrov lopte razmatrani su sljedeći zahtjevi i svojstva:

- što manje trošenje – što veća otpornost na abraziju
- mogućnost postizanja lijepog izgleda – sklad boja, oblika i sjaja
- što manja sposobnost upijanja vlage – vodootpornost
- odgovarajuća elastičnost, otpornost na udarce i podatnost pri kontaktu lopte s tijelom – modul elastičnosti, istezljivost, žilavost i odgovarajuća tvrdoća
- sposobnost da lopta u napumpanom stanju poprimi što okrugliji oblik – modul elastičnosti, istezljivost
- masa – prema FIFA-standardima ukupna masa lopte treba biti između 420g – 445g pa se masa pokrova mora uklopiti u te mjere
- sposobnost spajanja (lijepljenjem i/ili šivanjem)

Za oblogu lopte važni su sljedeći zahtjevi i svojstva:

- mehanička otpornost osobito prilikom udaraca – žilavost i čvrstoća
- odgovarajuća elastičnost – modul elastičnosti i istezljivost

- odgovarajuća tvrdoća
- odgovarajuća masa – obloga svojom masom sudjeluje u ukupnoj masi lopte

Za mjehur lopte važni su sljedeći zahtjevi i svojstva:

- nepropusnost za zrak
- mehanička otpornost, otpornost na udarce – čvrstoća i elastičnost te žilavost

Za šavove lopte važni su sljedeći zahtjevi i svojstva:

- što manja apsorpcija vode – vodootpornost
- izdržljivost kod udaraca – čvrstoća i žilavost

Za ventil lopte važni su sljedeći zahtjevi i svojstva:

- sposobnost materijala da sprječi izlazak zraka iz mjehura - elastičnost
- mehanička otpornost - žilavost i čvrstoća

Zbog velikog broja zahtjeva i svojstava nemoguće je objektivno procijeniti važnost svakog pojedinog svojstva. Zato se za određivanje faktora važnosti svojstava svih dijelova nogometne lopte koristi digitalno-logička metoda.

U tablici 1 prikazana su svojstva pokrova i faktori važnosti pojedinog svojstva dobiveni digitalno-logičkom metodom.

Kao što je u navedenoj tablici vidljivo, najvažnije svojstvo pokrova je što manja apsorpcija vode. Ukoliko bi se pokrov lopte natopio vodom bilo bi nemoguće igrati s njom jer bi joj se masa znatno povećala. Zbog veće mase lopte povećao bi se i broj ozljeda igrača prilikom udarca lopte.

Sljedeća po faktoru važnosti su žilavost i modul elastičnosti. Ova dva svojstva i istežljivost utječu jednoznačno ponašanje i dobra kontrola lopte u igri te na okruglost lopte u napumpanom stanju. Što bolja okruglost omogućuje lopti da se svaki put odbije jednako.

Otpornost na abraziju je manje bitno svojstvo pokrova iz razloga što se igra na dosta mekanoj travi pa ne dolazi do velikih oštećenja. To svojstvo je bitnije na betonskim terenima i sl. Do abrazije površinskog sloja ipak može doći pri udarcu kopačke u loptu.

Tablica 1. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva pokrova

Svojstvo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Pozitivne odluke	Faktor važnosti
Otpornost na abraziju	0	0	0	0	1	1																2	0,095
Žilavost	1						1	0	1	1	0											4	0,190
Tvrdoća		1					0					0	0	0	0							1	0,047
Apsorpcija vode			1					1				1				1	1	1				6	0,287
Modul elastičnosti				1					0				1			0			1	1		4	0,190
Masa					0					0				1			0		0			1	0,047
Istezljivost						0					1				1			0		0	1	3	0,144
Ukupno																						21	1,00

Masa pokrova čini manji dio mase lopte koja mora biti u određenim granicama.

Pokrov nogometne lopte mora imati odgovarajuću tvrdoću. Ovdje se pod tvrdoćom (mekoćom) podrazumjeva ponašanje lopte pri dodiru s nogom. Pokrov lopte pa i sama lopta ne smije biti pretvrda zbog prejakog odbijanja ili mogućih ozljeda, ali ne smije biti ni previše mekana.

Uz svojstva navedena u tablici 1 važna je i estetičnost, ali ona nije direktno određena vrstom materijala, već se na to može i naknadno utjecati. Izgled lopte je važan prilikom promocije lopte, ali zapravo je za loptu jedino bitno da se dobro vidi na terenu i na tv-ekranima.

U tablici 2 prikazana su svojstva obloge lopte i faktori važnosti za svako pojedino svojstvo. Najbitnija svojstva obloge su žilavost i modul elastičnosti. Višestruki slojevi obloge trebaju biti otporni na udarce, omogućiti dobro odbijanje lopte, ali i odgovarajuću elastičnu deformaciju. Također trebaju osigurati mekoću dodira s nogom ili glavom. Za loptu je važno da zadrži svoju elastičnost tijekom cijele utakmice (pa i dulje) kako bi igrači u svakom trenutku mogli predvidjeti putanju lopte.

S obzirom da se obloge sastoje od više slojeva poželjna je što manja masa tih slojeva, kako lopta ne bi bila preteška.

Slojevi također trebaju imati odgovarajuću čvrstoću da ne dođe do pucanja lopte tijekom igre.

Tablica 2. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva obloga

Svojstvo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Pozitivne odluke	Faktor važnosti
Čvrstoća	0	0	1	0							1	0,1
Modul elastičnosti	1				0	1	1				3	0,3
Žilavost		1			1			1	1		4	0,4
Tvrdoća			0			0		0		1	1	0,1
Masa				1			0		0	0	1	0,1
Ukupno											10	1,00

U tablici 3 prikazani su rezultati određivanja faktora važnosti pojedinih svojstava za mjehur lopte, dobiveni digitalno-logičkom metodom. Najvažnije svojstvo mjehura jest njegova nepropusnost za zrak. Osim toga mora imati dobru čvrstoću, odgovarajući modul elastičnosti i što više žilavost. Prilikom brojnih udaraca tijekom utakmice, unatoč oblogama i pokrovu, opterećenja dolaze i do mjehura, koji mora izdržati te udarce bez ispuštanja zraka. Čvrstoća je bitna da mjehur izdrži tlak zraka koji se nalazi u njemu.

Tablica 3. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva mjehura

Svojstvo	1	2	3	4	5	6	Pozitivne odluke	Faktor važnosti
Nepropusnost za zrak	1	1	1				3	0,5
Čvrstoća	0			1	1		2	0,333
Modul elastičnosti		0		0		1	1	0,167
Žilavost			0		0	0	0	0
Ukupno							6	1,00

U tablici 4 prikazana su svojstva šavova i njihovi faktori važnosti. Za šavove je podjednako bitno da imaju malu apsorpciju vode, izdržljivost i čvrstoću kako bi lopta zadržala svoja svojstva i jednaku kvalitetu tijekom utakmice.

Tablica 4. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva šavova

Svojstvo	1	2	3	Pozitivne odluke	Faktor važnosti
Apsorpcija vode	0	1		1	0,333
Žilavost	1		0	1	0,333
Čvrstoća		0	1	1	0,333
Ukupno				3	1,00

U tablici 5 prikazana su svojstva ventila i faktori važnosti za svojstva.

Ventili moraju imati dobru elastičnost i omogućiti lako otvaranje i brzo zatvaranje pri upuhivanju zraka u loptu. Osim dobre elastičnosti moraju biti čvrsti i otporni na udarce tijekom utakmice ili treninga.

Tablica 5. Rezultati digitalne-logičke metode s faktorima važnosti za svojstva ventila

Svojstvo	1	2	3	Pozitivne odluke	Faktor važnosti
Elastičnost	1	1		2	0,667
Žilavost	0		1	1	0,333
Čvrstoća		0	0	0	0
Ukupno				3	1,00

3.4. Testiranja nogometne lopte [4]

Svi nogometni klubovi koji žele nositi FIFA-inu oznaku kvalitete moraju zadovoljiti minimalne standarde koje ova organizacija propisuje. Za sva testiranja i certificiranje za FIFA program kvalitete zadužen je Švicarski savezni institut za znanost i tehnologiju materijala (Swiss Federal Laboratories for Science Materials and Technology – Empa). To je vodeći neovisni institut za testiranja kojima podliježu nogometne lopte.

U tablici 6 navedena su uobičajena ispitivanja koja se provode pri određivanju kvalitete nogometnih lopti. Također je naznačeno koja je lopta određena za koje ispitivanje.

Tablica 6. Broj lopte i redoslijed ispitivanja [4]

Redoslijed ispitivanja	Broj lopte
Opseg	1,2,3
Okruglost	
Zadržavanje oblika/veličine	
Apsorpcija vode	
Masa	4,5,6
Gubitak tlaka	
Odskakanje (elastičnost)	7,8,9
Zadržan kao referentni uzorak	6
Analiza materijala	10

Priprema lopti za ispitivanja

Potrebno je 10 identičnih modela koji se šalju ispitnom institutu. Po primitku lopti, ispitni institut dodjeljuje broj svakoj lopti između 1 i 10. Ovaj broj će odrediti testove koji se provode na tim loptama.

Uvjeti u kojima se vrše ispitivanja moraju biti sljedeći:

- Temperatura okoline mora biti sobna temperatura od $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ i vlažnost od $65\% \pm 5\%$
- Tlak u lopti: $0,8\text{ bar} \pm 0,01$

Da bi lopta bila odobrena od strane FIFA-e, mora zadovoljiti zahtjeve prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Zahtjevi za loptu [4]

Opseg lopte, cm		68,5 – 69,5
Najviše dozvoljeno odstupanje od okruglosti lopte, %		1,5
Odskakanje lopte, cm	na 20 °C	135 – 155
	na 5 °C	min. 125
	razlika najvećeg i najnižeg odbijanja za 3 testirane lopte	10
Najveća dopuštena apsorpcija vode, %		10
Masa lopte, g		420 - 445
Gubitak tlaka, %		20
Zadržavanje oblika i veličine (najveće dozvoljeno odstupanje)	Opseg	1,5 cm
	Okruglost	1,5 %
	Tlak	0,1 bar
	Šavovi/ventil	Nema oštećenja

Opseg lopte i okruglost

Ispitivanje opsega pokazuje dimenzije lopte kao srednju vrijednost dobivenu na temelju različitih osi mjerenja. Ovaj test je presudan kako bi se osiguralo da je lopta ispravne veličine za nogomet. Test okruglosti analizira zaobljenost lopte pomoću srednje vrijednosti izmjerenih radijusa lopte.

Opseg i okruglost se određeni pomoću kalibracijskog uređaja CSM (Circumference and Sphericity Measuring System) u kombinaciji s uobičajenim računalom i povezanim CSM softverskim paketom. Implementirani „FIFA mode“ se pokrene i optimizira ispitivanje, te daje konačne rezultate. Cijeli ispitni proces, koji uključuje rukovanje, umjeravanje i samo mjerenje, je detaljno propisan.

Na slici 25 prikazan je uređaj za mjerenje radijusa.



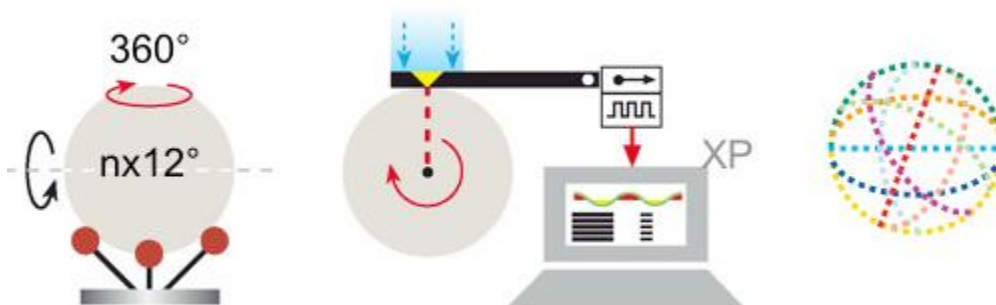
Slika 25. Uređaj za mjerenje radijusa [4]

Mjeri se radijus u 4500 točaka na lopti, te se opseg izračuna formulom:

$$O = 2r\pi. \quad (2)$$

Okruglost se računa prema razlici između vrijednosti svakog izmjenjenog radijusa i srednje vrijednosti od 4500 mjerenja. Okruglost se izražava u postocima.

Na slici 26 shematski je prikazano postavljanje lopte u uređaj i mjerenje radijusa.



Slika 26. Postavljanje lopte u uređaj, mjerenje, uzorak mjerenja [4]

Odskakanje lopte

Lopta se postavlja na položaj od $2,00 \pm 0,01$ m i pusti se da slobodno pada. Nakon što se lopte odbije od podlogu, zabilježi se visina odbijanja. Postupak se ponavlja 10 puta za svaku loptu. Testiranja se izvode na sobnoj temperaturi i na temperaturi od $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri čemu je potrebna dodatna priprema lopte. Lopta se priprema i hladi u komorama, a ukoliko se ispitivanje ne izvede u roku od 2 min, priprema se mora ponoviti. Priprema i hlađenje lopte traje oko 12 sati.

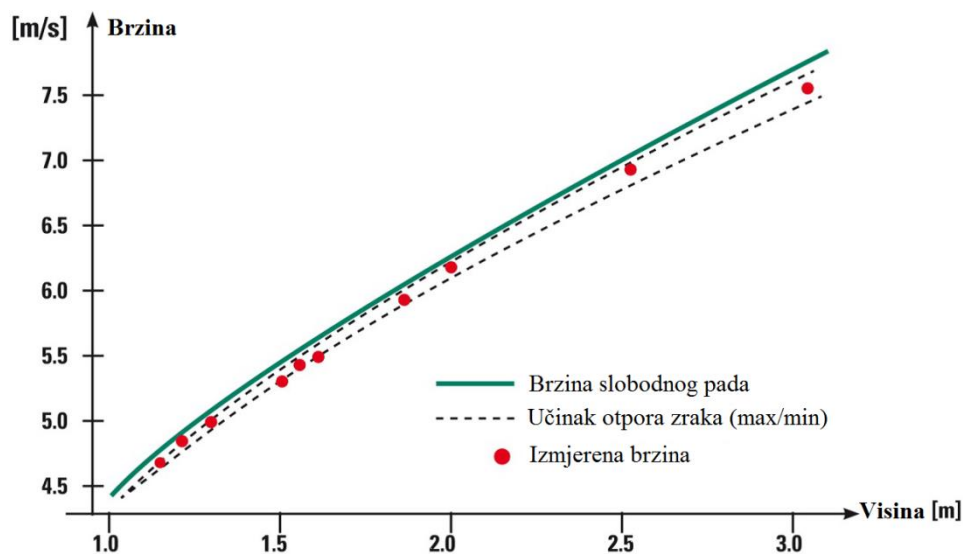
Na slici 27 prikazan je uređaj za mjerenje odskakanja lopte.



Slika 27. Mjerenje odskakanja lopte [4]

Brzina lopte i podloge na kojoj je lopta položena treba biti između 98,6% i 99% brzine pri slobodnom padu. Ovo smanjenje je zbog trenja sustava vodilice. Učinak trenja vodilice je usporediv s učinkom otpora zraka lopte.

Na slici 28 prikazan je dijagram brzine lopte u padu.



Slika 28. Brzina lopte u padu [4]

Apsorpcija vode

Lopta je postavljena u posudu s vodom. Pomoću pneumatskog klipa lopta se do određene mjere potopi u vodu i okreće u različitim smjerovima između stiskanja pomoću tri dodatna pneumatska klipa. Lopti se zatim mjeri masa nakon 250 ciklusa kompresije i uspoređuje s masom prije uranjanjem.

Na slici 29 prikazan je uređaj za mjerenje apsorpcije vode.



Slika 29. Mjerenje apsorpcije vode [4]

Uređaj mora biti sposoban postići kompresiju od 25% promjera nogometne lopte. Klip mora postići frekvenciju od najmanje 40 kompresija u minuti. Posuda mora biti okrugla, promjera 30 ± 2 cm, napunjena s $2 \pm 0,2$ cm vode.

Apsorpcija vode izražena je kao postotak povećanja mase nakon testa u odnosu na početnu masu.

Masa lopte

Uz standardnu pripremu lopte i temperature okoline, ovaj test bi se trebao provesti u zaštićenom prostoru kako bi se izbjegao bilo koji vanjski utjecaj. Koriste se elektroničke vage s točnošću od 0,01 g. Mjerenje se ponavlja 5 puta za svaku od 3 lopte. Za svaku loptu izračuna se prosječna vrijednost.

Na slici 30 prikazana je vaga za mjerenje mase lopte.



Slika 30. Mjerenje mase lopte [4]

Gubitak tlaka

Ovim testom mjeri se promjena tlaka u lopti tijekom vremena. Cilj je osigurati da se lopta ne ispuše prebrzo. Za mjerenje tlaka koristi se manometar s točnošću od $\pm 0,01$ bar. Nakon što je u lopti postavljen tlak od $0,8 \text{ bar} \pm 0,01$, mjeri se početna masa i lopta se skladišti na 72 sata. Tlak se zatim ponovno mjeri. Za svaku loptu, gubitak tlaka se izražava kao postotak gubitka tlaka između prvog i drugog mjerenja.

Na slici 31 prikazan je manometar za mjerenje tlaka u lopti.



Slika 31. Mjerenje tlaka [4]

Zadržavanje oblika i veličine

Pri ovom ispitivanju lopta se više puta pomoću topa ispucava u metalnu površinu prije nego se ponovno vrati u top. Broj ciklusa simulira upotrebu tijekom određenog vremenskog razdoblja. Zatim se loptama provjeravaju veličina, masa i oblik, kako bi se osiguralo da se oni ne mijenjaju značajno pri upotrebi.

Udaljenost od topa do čelične ploče je 2,5 m, a kut pod kojim se lopta ispucava je 30° .

Svaka od tri lopte ispucava se 2000 puta, izlaznom brzinom od 50 ± 1 km/h.

Na slici 32 prikazan je top za ispucavanje lopte.

Nakon ispitivanja lopta se ostavi u laboratorijskim uvjetima ($20 \pm 2^\circ \text{C}$ i $65 \pm 5\%$ vlažnost) najmanje 1 sat. Zatim se izvode sljedeći testovi (u navedenom redoslijedu) za sva tri uzorka:

1. mjerenje tlaka u lopti
2. vizualni pregled šavova i zračnog ventila
3. mjerenje opsega
4. određivanje okruglosti



Slika 32. Ispitivanje zadržavanja oblika i veličine [4]

Analiza materijala

Na loptama se provodi i analiza materijala iako to ne predstavlja kriterij za prolaz/pad. Karakterizacija materijala omogućuje identifikaciju bilo kojeg modela iz određene serije koja se zatim uspoređuje s izjavom proizvođača kako bi se osiguralo da model odgovara ispitanim loptama i deklariranom sastavu. Ovaj test zahtjeva kvalitetan uređaj za rezanje i mikroskop za analizu uzoraka. Mikroskop mora imati povećanje od 50 do 200 puta i razlučivost kamere minimalno 5 MP.

Materijal se izreže iz sredine dvaju neutralnih panela (bez ventila) s ravnom rezanja od $90 \pm 2^\circ$ u odnosu na ravninu panela. Na izrezanim uzorcima mjeri se debljina pojedinih slojeva lopte i računa se njihov prosjek. Dobiveni rezultati se uspoređuju s vrijednostima navedenim u deklaraciji proizvođača.

4. PREDIZBOR I IZBOR MATERIJALA

Kao moguće materijale pokrova odabrani su materijali prikazani u tablici 8. Svi materijali imaju dovoljno nisku sposobnost apsorpcije vode što je svojstvo s najvećim faktorom važnosti. Kod izbora materijala za pokrov lopte već u prvom koraku eliminirane su butilna i poliakrilatna guma zbog loše otpornost na abraziju i više istezljivosti od preostalih materijala. Prirodna guma ima odličnu otpornost na abraziju i malu gustoću, ali u odnosu na preostala dva materijala ima puno niže vrijednosti modula elastičnosti i žilavosti, a puno višu istezljivost.

Tablica 8. Svojstva materijala pokrova [10,11]

Materijal Svojstvo	Poliuretan	Butilna guma	Poliakrilatna guma	Prirodna guma	PVC
Apsorpcija vode, %	0,21	0,015	0,15	0,015	0,3
Tvrdoća, Shore A	63	65	70	60	63,5
Žilavost, J	1,84 – 4,97	0,07 – 0,1	-	0,15 – 0,25	1,46 - 5,12
Modul elastičnosti, GPa	1,31 – 2,07	0,0011	0,00121	0,0015 – 0,0025	2,14 – 4,14
Gustoća, kg/m ³	1155	1250	1095	950	1590
Otpornost na abraziju	Odlična	Loša	Loša	Odlična	Odlična
Istezljivost, %	60 - 550	500 - 550	100 - 350	500 - 800	11,9 - 80

Na temelju svega navedenog došlo se do zaključka da je najbolje pokrov lopte napraviti od sintetičke kože od PVC-a ili poliuretana kao što se standardne lopte i rade. Kao što je već prije u radu spomenuto, PVC ima nižu cijenu, ali s obzirom koliko je u nogometnom svijetu novaca, cijena materijala nema preveliki utjecaj na sami izbor. U odnosu na PVC, poliuretan ima manji modul elastičnosti i višu istezljivost.

Zbog svega navedenog kao konačan izbor i optimalni materijal za pokrov lopte odabrana je poliuretanska sintetička koža. Dovoljno dobra apsorpcija vode uz najbolju kombinaciju

modula elastičnosti, žilavosti i istezljivosti te dovoljno niska masa, ovaj materijal su postavili ispred svih drugih razmatranih materijala.

Tablica 9. Svojstva materijala obloge [10,11]

Materijal Svojstvo	Poliester	Pamuk	Ekspandirani poliuretan	Ekspandirani PVC
Modul elastičnosti, GPa	2,07 – 4,41	1,6 - 2	0,00025 – 0,0012	0,0320 – 3,38
Tvrdoća, HV	9,9 – 21,5	10 - 15	0,001 – 0,07	42 – 80*
Gustoća, kg/m ³	1040 - 1400	980 - 1300	16 - 115	60 - 100
Žilavost, J	1,09 – 1,69	1 – 2,5	0,005 – 0,09	-
Čvrstoća	Odlična	Srednja	Odlična	Odlična

* Shore A tvrdoća

U tablici 9 prikazana su svojstva određenih materijala za obloge. Profesionalne lopte izrađuju se od više slojeva obloga koji uključuju i poliester i/ili pamuk, te nekada i sloj pjene. Variranjem broja i debljine slojeva obloge te kombinacijom različitih materijala od kojih su napravljeni, mogu se postići svojstva obloge u širokom rasponu vrijednosti. Na isti način može se postići tražena masa lopte. Cilj je dobiti oblogu koja će doprinijeti zadržavanju oblika i elastičnosti lopte te omogućiti što bolju podatnost i kontrolu lopte. Svi materijali navedeni u tablici imaju dovoljno dobra svojstva žilavosti, modula elastičnosti i čvrstoće uz dovoljno nisku gustoću.

Tablica 10. Svojstva materijala mjehura

Materijal Svojstvo	Butilna guma	Lateks	Poliuretan	PVC
Nepropusnost za zrak	Odlična	Dobra	Odlična	Odlična
Čvrstoća	Odlična	Odlična	Odlična	Odlična
Žilavost	Dobra	Odlična	Dobra	Loša
Modul elastičnosti, GPa	0,0011	0,0015 – 0,0025	1,31 – 2,07	2,14 – 4,14

Za moguće materijale mjehura uzeti su materijali prikazani u tablici 10. Kao i kod izbora materijala za obloge i ovdje je bilo teško odabrati optimalni materijal. Za konačan izbor uzet je lateks zato što ima odličnu čvrstoću i žilavost. Ostali materijali imaju nešto lošija svojstva žilavosti ili čvrstoće pa su eliminirani. S obzirom da lateks ima nešto lošiju nepropusnost za zrak biti će potrebno češće pumpanje lopte.

Tablica 11. Svojstva materijala šavova

Materijal Svojstvo	Poliester	Aramid	Poliamid
Otpornost upijanju vode	Odlična	Odlična	Dobra
Žilavost	Odlična	Odlična	Odlična
Čvrstoća	Odlična	Odlična	Odlična

U tablici 11 prikazana su svojstva određenih materijala koji bi se mogli koristiti za šivanje panela nogometne lopte. Zbog lošije otpornosti prema upijanju vode eliminiran je poliamid te su u uži izbor ušli poliester i aramid. Ova dva materijala se najčešće i koriste za šivanje panela. Kao optimalni materijal izabran je poliester isključivo zbog niže cijene.

U današnje vrijeme sve češće se proizvode lopte čiji su paneli toplinski spojeni. Ovakav način spajanja omogućava postizanje bolje okruglosti lopte.

5. BUDUĆNOST NOGOMETNE LOPTE

Meksički znanstvenici 2010. godine dizajnirali su koncept za prozirnu loptu koja može mijenjati boju, poznatu pod nazivom CTRUS. Lopta je opremljena senzorima za mjerenje sile udarca i brzinu same lopte, a pomoću ugrađenog GPS odašiljača može se znati točna pozicija lopte na terenu. U središtu lopte je smješten elektronički sklop koji šalje sve informacije u kontrolno računalo na stadionu.

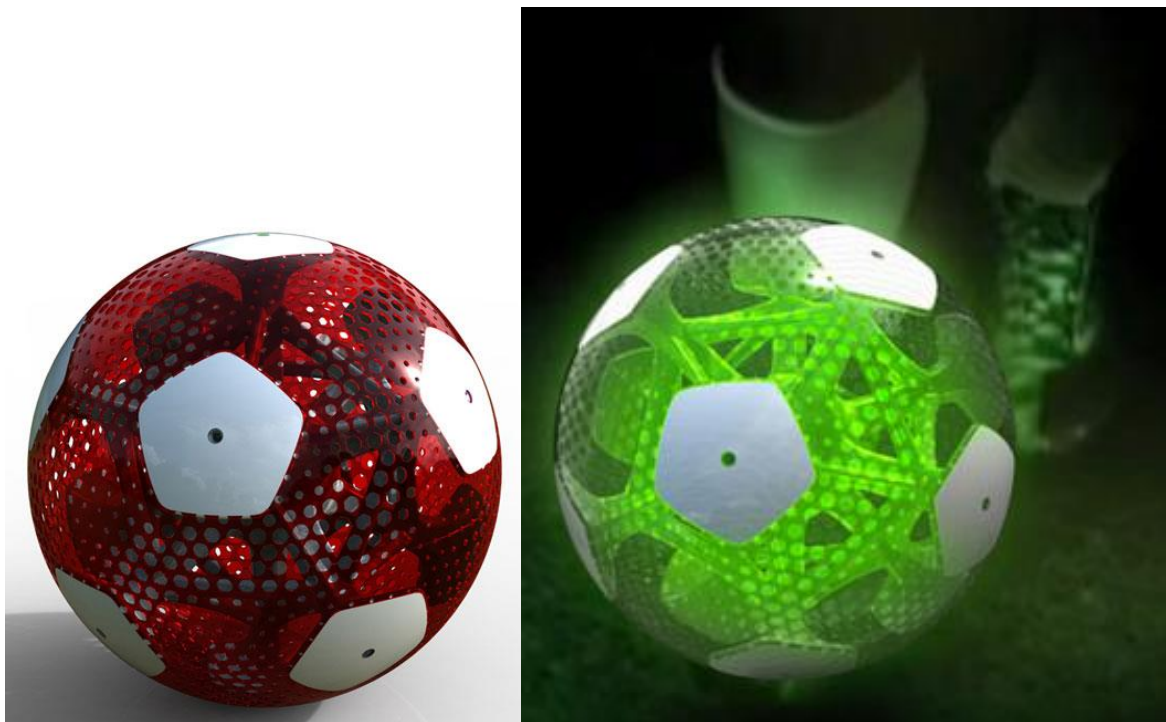
Na slici 33 prikazan je presjek lopte s čipom koji skuplja i pohranjuje podatke.



Slika 33. Presjek nogometne lopte s čipom [12]

Pozicija lopte na terenu, u svakom trenutku je poznata, pa jedna od zanimljivih mogućnosti ove lopte jest promjena boje prilikom izlaska izvan terena ili kada uđe u gol. U loptu su također ugrađene kamere koje daju potpuno novu dimenziju tijekom gledanja utakmice.

Na slici 34 prikazana je promjena boje nogometne lopte.



Slika 34. Promjena boje nogometne lopte [12]

Vanjski dio lopte čini rupičasti pokrov od fleksibilne plastike koja omogućava odskakanje na isti način kao kod standardne lopte. Unutarnji dio lopte je kostur koji čini potporu pokrovu. Kod ove lopte nema potrebe za mjehurom i pumpanjem. Ona propušta zrak i ne ovisi o njemu, što je njezina najveća prednost.

Na slici 35 prikazan je dio rupičastog pokrova lopte.



Slika 35. Rupičasti pokrov lopte [12]

S obzirom da je ovaj koncept nastao prije punih 8 godina, a da ovakva lopta nije ušla u širu primjenu, velika je vjerojatnost da projekt nikada neće zaživjeti. Ipak ni nogometna lopta nije uspjela odoljeti visoko tehnološkim mogućnostima. U loptu Adidas Telstar 18, kojom se igra na svjetskom prvenstvu u Rusiji, ugrađen je čip kojim je preko pametnog mobilnog telefona omogućena interakcija korisnika s loptom. Time korisnik dobiva pristup ekskluzivnom sadržaju i personaliziranim informacijama.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je izbor materijala nogometne lopte. Za svaki od slojeva lopte, analizirani su zahtjevi i svojstva, te su na temelju njih odabrani optimalni materijali. Vidljivo je da svaki sloj lopte ima svoju funkciju koju mora ispuniti te da svaki razmatrani materijal ima svoje prednosti i nedostatke.

Zbog velikog broja zahtjeva i svojstava nemoguće je objektivno procijeniti važnost svakog pojedinog svojstva. Zato se za određivanje faktora važnosti svojstava svih dijelova nogometne lopte koristi digitalno-logička metoda.

Na kraju su izabrani sljedeći optimalni materijali za pojedine dijelove lopte:

- pokrov: poliuretanska sintetička koža
- obloge: različite kombinacije poliestera, pamuka, ekspaniranog poliuretana ili ekspaniranog PVC-a
- mjehur: lateks
- šavovi: poliester.

Navedeni materijali daju idealnu loptu koja će zadovoljiti sve postavljene zahtjeve. Takva lopta ima minimalnu apsorpciju vode što znači da se njezina masa neće promijeniti tijekom utakmice. Odgovarajuća masa, tvrdoća i okruglost daju mogućnost predviđanja putanje leta i odskakanja lopte, te ugodan osjećaj prilikom dodira s njom.

Važno je napomenuti da su izabrani materijali jako slični ili isti materijalima koji se danas i koriste u nogometnim loptama.

Naravno svakim danom radi se na unaprjeđenju i poboljšanju lopte i ostalih aspekata nogometa kako bi pridonijeli što boljoj kvaliteti igranja. Lopte će u budućnosti možda imati još manje panela, veću zaobljenost i bit će napravljene od nekih drugih materijala, ali to ćemo vidjeti s vremenom.

LITERATURA

- [1] Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Tomislav Filetin, Zagreb, 2000. Godina [17.12.2017.]
- [2] <http://soccermommanual.com/laws-of-soccer-law-2-soccer-ball/> [13.05.2017]
- [3] <http://www.materials-talks.com/blog/2014/06/27/the-evolution-of-the-soccer-ball/> [13.05.2017.]
- [4] <https://www.fifa.com/> [10.12.2017.]
- [5] <http://www.soccerballworld.com/HistoryWCBalls.htm> [13.05.2017.]
- [6] <https://www.soccer.com/guide/soccer-ball-guide> [13.05.2017.]
- [7] http://www.soccerballworld.com/Soccer_Ball_Construction.htm#how [13.05.2017.]
- [8] <http://www.soccergearhq.com/what-is-a-soccer-ball-made-of/> [13.05.2017.]
- [9] <https://www.football-bible.com/soccer-info/what-is-a-soccer-ball-made-of.html> [13.05.2017.]
- [10] <http://polymerdatabase.com/index.html> [05.02.2018.]
- [11] <http://www.matweb.com/index.aspx> [05.02.2018.]
- [12] <https://www.designboom.com/design/ctrus-football-by-agent/> [10.12.2017.]

PRILOZI

I. CD-R disc